

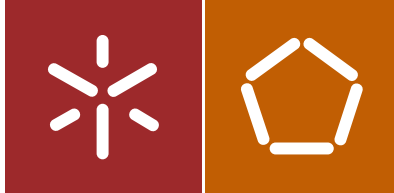


Carlos Filipe Brito da Silva

Aquisição e Desmodulação da
Banda de Correção GNSS para
Sistemas de Condução Autónoma

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carlos Filipe Brito da Silva

Aquisição e Desmodulação da
Banda de Correção GNSS para
Sistemas de Condução Autónoma

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Luís Alexandre Rocha

DECLARAÇÃO

Nome: Carlos Filipe Brito da Silva

Endereço eletrónico: carlosfbsilva8@gmail.com Telefone: 00351 916 102 420

Cartão do Cidadão: 13826892

Título da dissertação: Aquisição e Desmodulação da Banda de Correção GNSS para Sistemas de Condução Autónoma

Orientador:

Professor Doutor Luís Alexandre Rocha

Ano de conclusão: 2016

Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero deixar uma palavra especial de apreço à pessoa do meu orientador de dissertação, Professor Doutor Luís Rocha, por todo o conhecimento partilhado e pela constante presença e ajuda no decorrer de todas as fases da dissertação.

Quero também agradecer aos meus parceiros de laboratório (André P., Carlos F., Fábio L., Fábio M. e Pedro S.), que viveram comigo momentos de companheirismo e cooperação ao longo desta jornada, nunca descartando a amizade e a boa disposição.

Aos meus amigos de sempre, por nunca me deixarem só, pelos momentos de amizade e felicidade, pela motivação constante e por todos os momentos que passamos juntos, um obrigado especial.

À Marcela, a pessoa que me completa, por sempre acreditar em mim, por me reconfortar nos momentos de maior cansaço e desilusão, pelo carinho e amor inesgotáveis, pela pessoa que é e pela pessoa que sou graças a ela, um obrigado especial.

Por fim, mas nunca por último, tenho uma palavra de agradecimento especial à minha família, porque sempre acreditaram em mim e me acompanharam em todos os momentos. Pelo carinho e suporte que sempre me deram. Pela educação e disciplina que me permitem atingir os objetivos a que me proponho. Em especial ao meu Pai, Carlos Silva, que sempre me guiou pelos melhores rumos, me educou com os melhores valores e me fez o Homem que sou hoje, e sempre me disse: *“Porque na praia, quando só vês duas pegadas no caminho percorrido, não foste tu que andaste sozinho, fui eu que te levei ao colo”*.

A todos, por tudo, muito obrigado!

Este trabalho foi financiado pelo Projeto *“INNOVCAR: Inovação para Veículos Inteligentes”*, projeto n.º 002797, cofinanciado pelo FEDER através do Portugal 2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020).

RESUMO

Mais de 3400 pessoas morrem todos os dias nas estradas em todo o mundo e dezenas de milhares de pessoas são feridas e incapacitadas todos os anos. Crianças, pedestres, ciclistas e pessoas mais velhas são os elementos mais vulneráveis entre os utilizadores das estradas [1].

Um Sistema de Navegação Autónoma é uma solução num futuro próximo para alguns destes problemas, procurando evitar ao máximo e autonomamente acidentes de viação para que os perjúrios de navegação sejam reduzidos, e consequentemente que seja observado um aumento da segurança das pessoas e do mundo.

Hoje em dia estão a ser feitos investimentos consideráveis neste tipo de sistemas e há até empresas que já se encontram a trabalhar nesta temática, apresentando já alguns protótipos, como por exemplo o veículo autónomo da marca TESLA™. É expectável que uma solução estável seja apresentada nos próximos anos.

Este tipo de sistemas é bastante complexo, contudo a sua complexidade pode ser mais facilmente desmistificada através de uma divisão do sistema “por blocos”. Um dos blocos é conhecido como ECU – “*Engine Control Unit*” e é responsável pela aquisição de toda a informação dos outros blocos constituintes do sistema e assim “conduzir” o carro através do controlo do motor, travões, ângulo de viragem, etc. Um outro bloco destacável trata-se por “*Traffic Awareness System*”, e este é composto por um LIDAR (*Light Detection and Range*), câmaras e radares para analisar a envolvente do veículo, como carros, pedestres, sinais de trânsito, entre outros, e tem como função o desvio de obstáculos e tem um peso importantíssimo na tomada de decisões do sistema, para que evite acidentes e cumpra com o código da estrada. Por fim destaca-se o Sistema de Posicionamento, composto por um sistema de navegação por satélite GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e um sistema de navegação inercial IMU (*Inertial Measurement Unit*) composto por sensores inerciais como acelerómetros e giroscópios, por vezes são completados por magnetómetros e barómetros. A junção dos sistemas GNSS e IMU permite a determinação da posição e cinemática do veículo com alta precisão.

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de um sistema capaz de receber a aquisição e desmodulação do sinal proveniente dos Serviços de correção GNSS. A banda de correção é um sinal de satélite difundido por determinadas zonas (consoante o satélite) que contém informações para melhorar e corrigir o pós-processamento da posição mediante o GNSS. O serviço de correção é executado por um pequeno leque de empresas, que tem infraestrutura dedicada ao cálculo dos desvios

dos sinais GNSS e das correções a aplicar em cada instante, pelo que calculam a informação de correção e depois fazem comunicação da mesma, através de algumas técnicas, nomeadamente internet e satélite. Este serviço é pago, pelo que para descriptar a informação contida na banda de correção é necessária a aplicação de uma chave de descriptação para ter acesso total aos dados.

Para atingir este objetivo, foram feitas várias investigações sobre processamento de sinal e utilização de SDRs (*Software Defined Radios*) e estas são apresentadas neste documento, assim como testes sobre várias temáticas incluindo aquisição de sinais, modulação e desmodulação dos mesmos, etc.

PALAVRAS CHAVE: SISTEMA DE NAVEGAÇÃO AUTÓNOMA, SISTEMA GNSS, SERVIÇO DE CORREÇÃO GNSS, PROCESSAMENTO DE SINAL

ABSTRACT

Over 3400 people die on the world's roads every day and tens of millions of people are injured or disabled every year. Children, pedestrians, cyclists and older people are among the most vulnerable of road users [1].

An Autonomous Navigation system is a near future solution for some of these problems, aiming to autonomously avoid road accidents in order to reduce traffic injuries.

Nowadays there are some important investments in this kind of systems, and some companies are already working to build some of them in order to have some solutions in a few years.

The complexity of these systems can be simplified dividing them in blocks. One of the blocks can be commonly known as an ECU - Engine Control Unit. This block is responsible to gather the information from the other blocks and autonomously "drive" the car by handling the engine, breaks, steering wheel, etc. Another block can be called the Traffic awareness system, characterized by a LIDAR (Light Detection and Ranging), cameras and radars to avoid obstacles, read traffic signs, etc. Last but not least another very important block is the Autonomous Localization system, composed by a GNSS (Global Navigation Satellite System) and Inertial Sensors like accelerometers and gyroscopes to determine car's positions with high resolution. This dissertation's main goal is to develop a system that is capable to perform acquisition and demodulation of GNSS Correction Services signal. GNSS Correction Band is a satellite widespread signal that contains information to improve and correct GNSS post-processing, improving also the precision of position and motion measurement. This Correction Service is performed by some specific Enterprises and it is a paid service, so in order to use it, it is needed a specific key to decrypt the data.

In order to achieve this objective, some investigation about signal processing and SDR management was performed and it is explained in this document, along with some tests to prove the system's feasibility.

KEYWORDS: Autonomous Navigation Systems, GNSS system, GNSS Correction Services, Signal Processing

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	XIV
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	XV
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação	2
1.2 Objetivos da Dissertação	5
1.3 Estrutura do Documento.....	6
2. Estado da Arte	7
2.1 Serviços de Correção GNSS.....	7
2.1.1 RTK – <i>Real Time Kinematics</i>	7
2.1.2 PPP – Precise Point Positioning	8
2.1.3 SBAS – Satellite Based Augmentation System	11
2.2 Recetores Comerciais de Sinal de Correção GNSS	14
2.2.1 Hemisphere® AtlasLink™ GNSS Smart Antenna.....	14
2.3 Conclusão do Estado da Arte.....	21
3. Fundamentação Teórica.....	25
3.1 Modulação Digital de Sinais.....	25
3.1.1 ASK – Amplitude Shift Keying	27
3.1.2 FSK – Frequency Shift Keying.....	28
3.1.3 PSK – Phase Shift Keying	30
3.1.4 QAM – Quadrature Amplitude Modulation	32
3.2 Propriedades de Combinações de Sinais Sinusoidais	34
3.2.1 Modulação BPSK.....	35
3.2.2 Multiplicação de Sinusoides com Diferentes Fases	36

3.3	Desmodulador Costas Loop.....	38
3.4	Sintonizador Rádio	39
4.	Geração e Aquisição de Sinal BPSK.....	43
4.1	Geração de Sinal BPSK	44
4.1.1	Estrutura da Informação Modulada	47
4.1.2	Transmissão da Mensagem MATLAB	48
4.1.3	Transmissão da Mensagem a partir da API UHD	50
4.2	Sintonização do Sinal recorrendo ao L-Band Tuner Max2121	51
4.3	Aquisição do Sinal	54
4.4	Descodificação de Dados.....	54
5.	Módulo de Correção GNSS.....	61
5.1	Desenvolvimento da DaughterBoard	61
5.1.1	RF Analog Frontend	61
5.1.2	MAX2121	62
5.1.3	Conversor SPI para I2C CP2120.....	63
5.1.4	Circuito de Leitura	64
5.1.5	Conexão com a <i>MotherBoard</i> APP.....	65
5.2	Configuração e Programação da <i>Daughterboard</i>	67
5.2.1	Configuração Conversor SPI para I2C.....	68
5.2.2	Configuração MAX2121	68
5.2.3	Configuração ADC	69
5.2.4	Envio das Amostras por CAN	71
5.3	Cenário de Aplicação do Módulo de Receção do Sinal de Correção.....	71
6.	Resultados e Discussão.....	75
7.	Conclusão.....	79
8.	Bibliografia.....	81
	Anexo I – Esquemáticos do Módulo de Correção GNSS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Visão Geral Sistema de Condução Autónoma	3
Figura 1-2 Visão Geral APP	4
Figura 2-1 Sistema RTK	7
Figura 2-2 Cobertura Satélites PPP	9
Figura 2-3 Sistema PPP	10
Figura 2-4 Sistema SBAS	11
Figura 2-5 Cobertura Sistemas SBAS	12
Figura 2-6 Mensagem SBAS Outline	12
Figura 2-7 Cobertura Sistema Atlas	15
Figura 2-8 Sistema Atlas	16
Figura 2-9 AtlasLink Smart Antenna	17
Figura 2-10 Atlas SmartLink	19
Figura 2-11 Atlas BaseLink	20
Figura 2-12 AtlasLink + Atlas Overview	21
Figura 2-13 Cobertura RTK	22
Figura 3-1 Esboço de um Sistema de Comunicação Generalista	26
Figura 3-2 Sistema de Modulação Generalista	26
Figura 3-3 Modulação ASK	27
Figura 3-4 Modulação OOK	28
Figura 3-5 Modulação FSK	29
Figura 3-6 Diagrama de Constelação BPSK	30
Figura 3-7 Modulação BPSK	30
Figura 3-8 Diagrama de Constelação QPSK	31
Figura 3-9 Modulação QPSK	31
Figura 3-10 Diagrama de Constelação 16-QAM	33
Figura 3-11 Diagrama de Constelação 64-QAM	33
Figura 3-12 Diagrama de Constelação 256-QAM	33
Figura 3-13 Diagrama de Constelação 8-QAM Cross	33
Figura 3-14 Modulação 8-QAM	34

Figura 3-15 Sinal Digital Binário	35
Figura 3-16 Sinal Digital Polar	35
Figura 3-17 Sistema de Modulação BPSK	36
Figura 3-18 Sinal Modulado em BPSK.....	36
Figura 3-19 Sinal Modulado em BPSK * Onda Portadora	38
Figura 3-20 Desmodulador Costas Loop – Visão Geral	39
Figura 3-21 Diagrama de Blocos Sistema de Conversão Direta	40
Figura 4-1 Visão Geral Sistema de Modulação e Desmodulação BPSK	43
Figura 4-2 USRP N210	44
Figura 4-3 Arquitetura do Sistema de Radio USRP N210	45
Figura 4-4 UBX40.....	45
Figura 4-5 Diagrama de Blocos da DaughterBoard UBX40.....	46
Figura 4-6 Estrutura da Mensagem	47
Figura 4-7 Suporte em Simulink para utilização do USRP	48
Figura 4-8 Modelo Simulink de Emissão de Sinal.....	49
Figura 4-9 Representação Tx_Streamer.....	51
Figura 4-10 Diagrama de Blocos Max2121.....	52
Figura 4-11 Max2121 EV Kit.....	52
Figura 4-12 Aplicação de Configuração do Max2121	53
Figura 4-13 NI DAQ-USB 6363.....	54
Figura 4-14 Amostras IQ.....	55
Figura 4-15 Curva de Fase de um Sinal Desmodulado cuja Frequência da Portadora é Diferente da do Sinal Modulado.....	56
Figura 4-16 Fase e Diferença de Fase Instantâneas.....	57
Figura 4-17 Mudança de Fase Detetada.....	58
Figura 4-18 Sinal Binário Reconstruído.....	59
Figura 5-1 Circuito de Entrada RF	62
Figura 5-2 Resposta em Frequência do Circuito de Entrada	62
Figura 5-3 Conversor CP2120.....	63
Figura 5-4 Andar de Filtragem e Amplificação dos Sinais Diferenciais IQ à saída do Conversor	65
Figura 5-5 Esquemático dos Conectores	66

Figura 5-6 Fluxograma do Programa de Utilização do Módulo APP.....	67
Figura 5-7 Mensagem SPI do ADC	70
Figura 5-8 Vista de Topo Módulo de Correção	72
Figura 5-9 Vista de Baixo Módulo de Correção.....	72
Figura 5-10 Visão Geral sobre o Processo de Desmodulação utilizando o Módulo de Correção	73
Figura 6-1 Funcionamento do Algoritmo de Desmodulação em Ponto Crítico	76
Figura 6-2 – Sinal de Dados Recuperado e Onda de Fase do Sinal	77
Figura 6-3 - Mudança de Fase Detetada e Variação do Valor do Bit.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 5-1 Configuração CP2120	68
Tabela 5-2 Configuração Registos MAX2121	69
Tabela 5-3 Configuração ADC	70

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ADC	Analog-to-Digital Converter
APP	Automotive Precise Positioning
API	Application Programming Interface
ASK	Amplitude Shift Keying
Bps	Bits per Second
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CAN	Controller Area Network
DC	Direct Current
DAC	Digital to Analog Converter
DDC	Digital Down-Converter
DCR	Direct-Conversion Receiver
DSP	Digital Signal Processor
DUC	Digital Up-Converter
ECU	Engine Control Unit
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EOT	End of Text
ESR	Equivalent Series Resistance
FEC	Forward Error Correction
FSK	Frequency Shift Keying
GNSS	Global Navigation Satellite System
I2C	Inter-Integrated Circuit
IC	Integrated Circuit
IF	Intermediate Frequency
IMU	Inertial Measurement Unit
GAGAN	GPS and GEO Augmented Navigation
GEO	Geostationary Earth Orbit
GIVE	Grid Ionospheric Vertical Error
GPS	Global Positioning System
GPSDO	GPS Disciplined Oscillator
LIDAR	Light Detection and Ranging

LPF	Low Pass Filter
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OOK	On-Off Keying
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PLC	Programmable Logic Controller
PPP	Precise Point Positioning
PSK	Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematics
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SiS	Signal in Space
SPI	Serial Peripheral Interface
SDR	Software Defined Radio
TCXO	Thermally Compensated Cristal Oscillator
UDRE	User Differential Range Errors
UHD	USRP Hardware Driver
UHF	Ultra-High Frequency
USB	Universal Serial Bus
USRP	Universal Software Radio Peripheral
VCO	Voltage Controlled Oscillator
WAAS	Wide Area Augmentation System

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos a necessidade de mobilidade humana e de mercadorias tem sido intensificada e a evolução da história leva-nos do ponto em que as deslocações eram apenas locais e de apenas alguns quilómetros para procura de alimentos, ao ponto em que é possível no mesmo dia acordar em Portugal e adormecer na Nova Zelândia. Esta evolução passa por vários marcos históricos, a título de exemplo a invenção da roda e primeiros veículos com rodas por volta do quarto milénio a.C., a invenção do motor a vapor que permitiu o aparecimento de veículos capazes de transportar seres humanos em 1769 e ainda o primeiro carro movido a motor de combustão em 1885. É então afirmável que o investimento de tempo e conhecimento em melhorar as condições de mobilidade é comum ao ser humano desde os princípios da sua existência.

A mobilidade [2] resulta da necessidade de o ser humano ter de participar em diferentes atividades que normalmente se desenrolam em locais fisicamente distantes e isto implica a sua deslocação entre eles, porque usualmente as atividades, obrigatórias ou não, requerem a presença física do indivíduo no local onde estas decorrem.

A procura da satisfação das necessidades do ser humano, quer sejam elas fisiológicas, económicas, sociais, etc., passa pela realização de uma série de atividades específicas que implicam deslocações espaciais entre elas. Nos dias que correm há até uma necessidade da realização de algumas atividades mesmo nos períodos de transição, ou seja, durante as viagens o ser humano sente necessidade de realizar algumas atividades, como por exemplo consulta e resposta a e-mails, consulta de informações pessoais disponibilizadas em agendas e/ou *smartphones*, comunicações com outras pessoas, visualização de vídeos de diversos temas, atividades lúdicas, etc.

Com o aumento da esperança média de vida, o aumento da utilização de veículos próprios pelas classes inferiores, aumento da percentagem de mulheres com carta de condução e aumento gradual da população em geral, é expectável que as necessidades a nível da mobilidade exponenciem ao longo dos próximos anos. É então expectável um aumento do investimento a curto e médio prazo em questões de inovação na mobilidade e no setor dos transportes, de forma a garantir ao mundo uma mobilidade sustentável e acima de tudo, segura para o utilizador.

Por outro lado, com a crescente inovação tecnológica, têm vindo a ser implementadas vários extras nos veículos, que visam o aumento da segurança rodoviária e a redução de risco e ocorrência de acidentes, por exemplo o sistema PRE-SAFE® da Mercedes-Benz [3] que trava automaticamente o

veículo numa situação de emergência, quando um alvo é avistado previamente a uma distância não inferior a 200 metros.

Por fim, uma outra tecnologia que tem sido bastante explorada é a de sistemas que permitam aos condutores conhecer a sua posição atual e que ainda permitam ajudar no planeamento das rotas, assim como garantir informações ao longo do caminho sobre a direção a seguir. Estes sistemas já existem atualmente e são exemplo o GPS (*Global Positioning System*) como sistema de posicionamento e o TomTom como sistema de navegação.

Os sistemas de localização como o GPS[4] são baseados em sinais emitidos por satélites e começaram a sua atividade na Guerra Fria na década de 60 e têm vindo até hoje a ser melhorados para que a precisão de posicionamento seja o maior possível.

1.1 Enquadramento e Motivação

Entre os pontos dominantes no leque das investigações para soluções no ramo automobilístico, destacam-se os sistemas de condução autónoma, que são sistemas de grande complexidade que permitem aos utilizadores de carros a abstração da tarefa de condução. Desta forma é permitido ao utilizador descansar enquanto viaja, assim como tratar de outras atividades enquanto se desloca entre pontos de interesse. A par desta investigação surgem também grandes investimentos no que toca a sistemas de localização de alta precisão e fiabilidade, que são também parte integrante de um sistema de condução autónoma.

Uma das empresas destacadas no atual desenvolvimento deste tipo de sistemas é a Bosch, uma empresa com décadas de história, fundada por Robert Bosch e cujo principal ativo de mercado são componentes automóveis, que embargam desde os componentes básicos de um carro como os travões aos sistemas mais modernos de acompanhamento à condução como os atuais e sofisticados computadores de bordo.

Em parceria com a Universidade do Minho no projeto INNOVCAR, a empresa Bosch procura encontrar soluções para os seus desafios e encontrar novas medidas que melhorem as suas atividades industriais e de investigação. O sistema de condução autónoma é também um objetivo a ser atingido nesta parceria, e esta dissertação surge no âmbito da linha APP (*Automotive Precise Positioning*), o sistema de posicionamento a integrar no sistema de condução autónoma.

A estrutura planeada do sistema de condução autónoma pode ser sumariamente exemplificada na Figura 1-1.

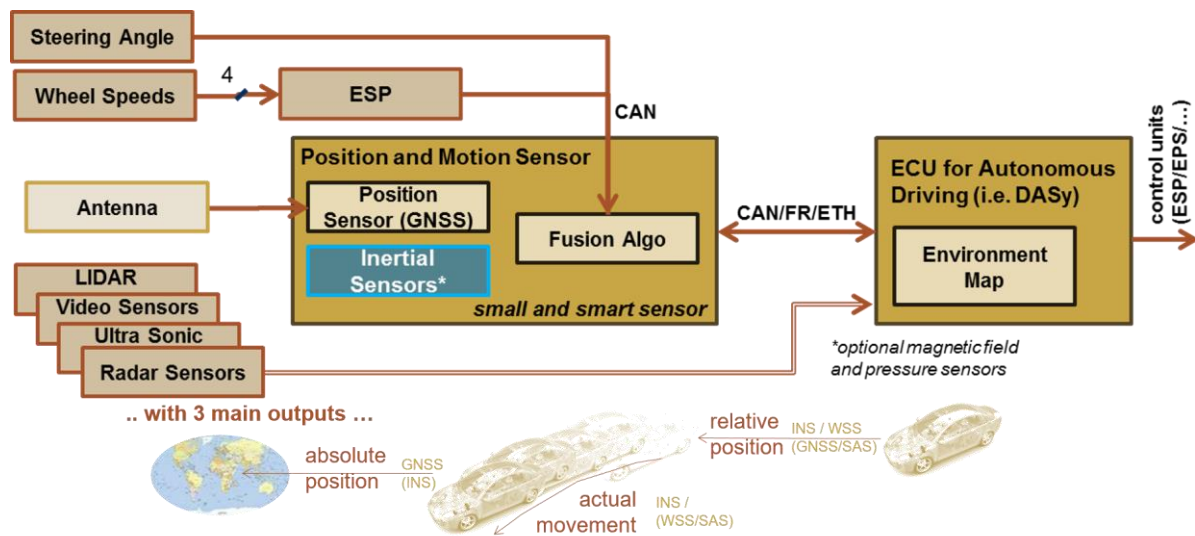


Figura 1-1 Visão Geral Sistema de Condução Autónoma

É então observável a presença central de um bom sistema de posicionamento, caracterizado por um sistema de navegação por satélite[5] e complementado por um sistema de sensores inerciais[6] aliados a um algoritmo de fusão destas duas grandezas. O sistema APP é apresentado na figura acima como “*Position and Motion Sensor*”, quer isto dizer que é pretendido que o sistema seja capaz não só de determinar a posição atual, como também as características do movimento do carro como velocidade e aceleração. Estas informações serão depois utilizadas para fazer uma monitorização constante do movimento e posição, de forma a que a previsão das ações do sistema de condução autónoma sejam eficazes e não conduzam o veículo a acidentes de viação.

De forma a atingir as características supracitadas, o sistema APP é bastante complexo e contém uma série de sensores que permite a garantia de fiabilidade na determinação das grandezas associadas ao posicionamento e movimento do veículo.

Na Figura 1-2 é então apresentado o sistema APP, onde são destacados a castanho os sensores de *input* das variáveis do movimento do carro, como a velocidade e ângulo de viragem associados às rodas do mesmo. A azul estão representados os sensores específicos para a aplicação, são eles: um acelerómetro de 3 eixos e um giroscópio de 3 eixos para monitorização das grandezas físicas de velocidade, aceleração e aceleração angular; um magnetómetro para calibração da direção; um barómetro para medir pressão e um termohigrómetro para medir temperatura e humidade de forma a prever o estado da meteorologia e consequentemente das condições das estradas, assim como para

determinar os efeitos destes fatores nos restantes sensores; por fim um sensor de posição por satélite, para determinação da posição absoluta no globo.

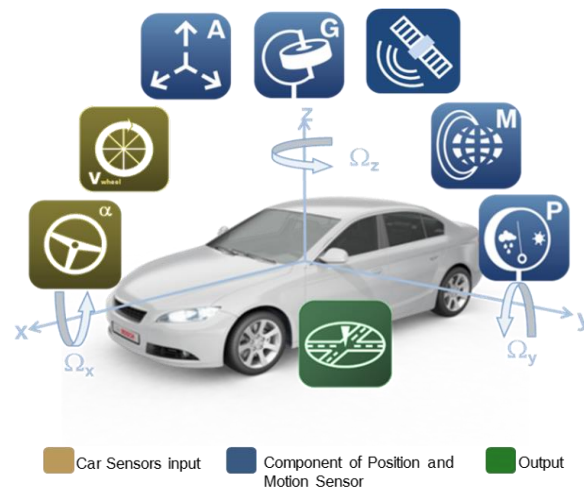


Figura 1-2 Visão Geral APP

O *output* esperado para este sistema é composto pelas medidas instantâneas de posição e movimento do veículo, de modo a serem utilizadas pelo sistema de condução autónoma.

A incidência principal desta dissertação está ligada ao sensor de posição por satélite, e mais especificamente incide na criação de um módulo de aquisição e desmodulação do sinal de correção GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Sendo este módulo parte integrável do sistema APP, todos os requisitos de Hardware do sistema APP devem ser respeitados também no desenvolvimento deste módulo.

Há uma série de mecanismos de correção do sinal GNSS, e aliados a eles, há também várias formas de o transmitir, as quais serão apresentadas na Secção 2 relativa ao estado de arte. Apesar desta panóplia de opções relativa à sua transmissão, a maioria dos sinais de correção são emitidos por satélites geoestacionários, em comunicações semelhantes às que são usadas pelos satélites de GPS. Há ainda a possibilidade deste sinal ser recebido pela internet [6], contudo a cobertura por satélites geoestacionários é mais abrangente do que a de internet, pelo que há uma preferência na utilização dos sinais emitidos por satélite.

Usualmente estes sistemas são denominados por *Augmentation Systems*[7], pela tradução: Sistemas de Aumento, e permitem o aumento da resolução na determinação da posição, assim como o aumento da fiabilidade do sistema. Maioritariamente, estes serviços são utilizados em áreas da indústria onde a precisão de medição da posição é crucial para a correta execução das tarefas associadas às suas atividades e são exemplo disto os setores aeronáuticos, agrícolas, mineiros, topológicos, etc. A condução

autónoma é a atividade emergente que também necessita deste tipo de precisão na determinação do posicionamento, daí a necessidade de um sistema capaz de adquirir o sinal de correção GNSS.

Os sistemas de correção GNSS são usualmente compostos por uma infraestrutura terrestre com antenas e relógios de alta precisão, localizadas em posições específicas de referência e que graças a estas características, conseguem determinar os erros associados às informações provenientes dos satélites de localização. Além das infraestruturas imóveis, os sistemas de correção são ainda melhorados através da utilização de unidades móveis (denominadas por *rovers*) que permitem o alargamento das zonas onde é aplicável a correção dos serviços de posicionamento. Os erros estão associados a diversos fatores, e por sua vez estes apresentam valores inconstantes, pelo que há necessidade de uma correção constante para atingir valores de medição exatos, precisos e fiáveis [8].

1.2 Objetivos da Dissertação

Esta dissertação, pela sua generalidade, envolve uma série de objetivos a cumprir de forma a que o objetivo geral seja alcançado. Em seguida serão sumariamente apresentados os objetivos, atendendo a uma encapsulação dos itens específicos dentro dos objetivos gerais.

- Interiorização com o sistema de posicionamento GNSS:
 - Diferentes constelações de satélites existentes;
 - Funcionamento de um sistema de localização por satélite;
 - Fatores que introduzem erros de medição.
- Conhecimento dos mecanismos de correção GNSS:
 - Tipo de tecnologia de correção;
 - Mecanismos de comunicação entre serviço e cliente.
- Aquisição do sinal de correção:
 - Planeamento dos componentes eletrónicos necessários para o efeito;
 - Conceção da PCB (*Printed Circuit Board*);
 - Teste do funcionamento da PCB;
 - Transferência do sinal analógico a digital para posterior processamento.
- Desmodulação e decodificação do sinal (BPSK);
 - Criação de algoritmo de decodificação;
 - Teste de algoritmos em ambiente de Simulação;
 - Geração de sinal de referência, conhecido e modulado também em BPSK;
 - Teste de algoritmo de desmodulação em sinal de referência;
 - Decodificação de sinal desmodulado em informação útil.
- Utilização dos dados de correção para melhorar o serviço de posicionamento por satélite.

A execução das tarefas conducentes à conclusão destes objetivos permite o correto desenvolvimento de um sistema totalmente capaz de adquirir a banda de correção GNSS e a sua utilização para melhoria da capacidade de determinar a posição do sistema APP.

1.3 Estrutura do Documento

Este documento apresenta uma organização construtiva de conhecimento adquirido, e posteriormente aplicado no decorrer da execução das tarefas. De forma a indicar a correta ordem cronológica dos acontecimentos e tarefas, o documento está dividido em 7 capítulos principais.

O primeiro capítulo é de carácter introdutório e é pretendido com este fazer uma primeira aproximação ao tema, explicando o seu enquadramento e quais as motivações associadas.

O segundo capítulo é composto pelo estado de arte das tecnologias de correção GNSS existentes.

No terceiro capítulo, Fundamentação Teórica, são apresentados conceitos chave, necessários para compreender as implicações de uma comunicação ponto a ponto por radiofrequência.

Seguidamente, é apresentado um teste de emissão e receção de um sinal modulado, onde é descrita a geração do sinal, assim como o algoritmo desenvolvido para desmodular estes sinais.

Em quinto lugar, surge a construção de um módulo de receção do sinal de correção GNSS, e são ainda indicadas as suas características.

Após as tarefas de desenvolvimento de algoritmos e ainda do módulo de correção, surge no capítulo 6 uma discussão sobre os resultados obtidos.

Por fim, é apresentada no último capítulo, a conclusão do documento, seguida da bibliografia, onde são apresentadas as referências consultadas para o desenvolvimento do trabalho a que esta dissertação relata e ainda o Anexo I, que contém os esquemáticos do módulo de correção desenvolvido.

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentado o estado da arte na altura da escrita deste documento, desta forma serão apresentadas soluções de correção ao sinal de GNSS, apresentando para cada uma o seu funcionamento geral, vantagens e desvantagens associadas.

Será também apresentado um exemplo de um recetor do serviço de correção GNSS, quais as suas características e cenários de aplicação onde este é utilizado, ou que ainda possa vir a ser utilizado. É também importante referir que este recetor é uma boa referência para o Sistema de Correção a desenvolver para o sistema de posicionamento APP, sendo que é um sistema fiável e capaz de manter uma correção constante ao sinal GNSS.

2.1 Serviços de Correção GNSS

Neste subcapítulo são apresentadas técnicas de correção GNSS[9] existentes, e será para cada uma sumariamente explicado o tipo de análise que é feita e a forma utilizada para que a informação de correção seja entregue ao utilizador do serviço.

2.1.1 RTK – *Real Time Kinematics*

A técnica de correção RTK[10] baseia-se na análise da portadora dos sinais de GNSS numa estação base com posição conhecida. Esta estação, mediante a análise do sinal emitido pelo satélite envia correções instantâneas para estações móveis (e/ou utilizadores finais do serviço de correção) nas suas proximidades através de um sinal rádio na gama das UHF (*Ultra High Frequency*).

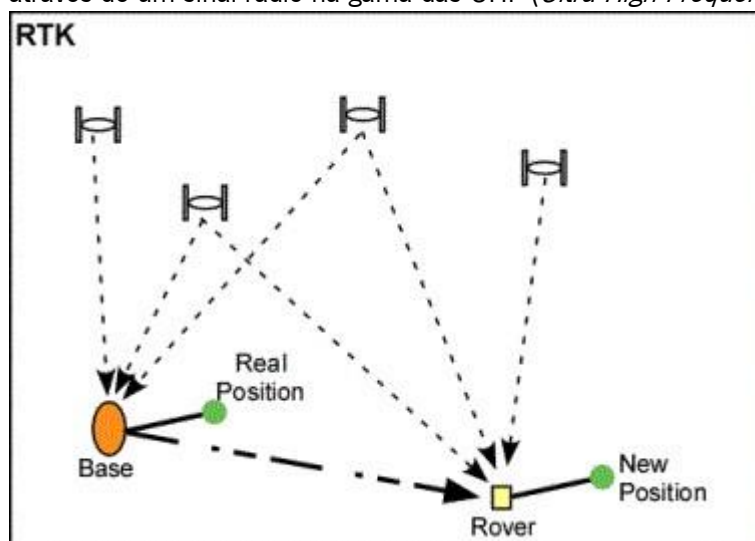


Figura 2-1 Sistema RTK

A Figura 2-1[11] representa de uma forma simplificada o sistema de correção RTK. Como é perceptível pela análise da imagem este tipo de serviço de correção é principalmente limitado pelo alcance do sinal de rádio emitido pela estação base, o que implica a existência de uma ou várias estações base com as coordenadas bem conhecidas nas proximidades do utilizador do serviço para que haja possibilidade de perfazer a correção do sinal GNSS em tempo real.

Tecnicamente, o serviço RTK tira partido de uma medição diferencial entre um ponto com coordenadas fixas e bem conhecidas (Estação Base) e um ponto móvel com recetor de sinal nas redondezas (*rover*), da distância do satélite, consoante o número de ciclos e fase da onda portadora. Este procedimento permite mitigar os efeitos negativos da ionosfera, efeito de Doppler, entre outros.

Este tipo de correção permite uma resolução de posicionamento na ordem dos [0.5 – 2.0] cm horizontal e [1.0 – 3.0] cm vertical, ou seja, numa medição de posição absoluta no globo e depois da correção RTK, esta terá no máximo um erro de 2.0 cm lateral e 3.0 cm vertical. Em sistemas de navegação usuais não é necessário este valor de resolução, pelo que usualmente este serviço é utilizado por serviços onde a precisão de localização é um fator crítico para um bom desempenho da tarefa associada, como por exemplo a topografia geográfica.

2.1.2 PPP – Precise Point Positioning

A técnica *Precise Point Positioning* [12] é utilizada como serviço de correção e baseia-se nas atuais constelações GNSS.

Combinando as posições precisas dos satélites e dos relógios com um recetor GNSS de dupla frequência, a técnica PPP consegue garantir uma resolução de posicionamento que varia entre alguns centímetros a poucos decímetros, dependendo de algumas variáveis, sendo o maior influenciador da qualidade da correção o tempo em que a mesma vem a decorrer. O tempo de convergência do serviço PPP está no intervalo entre os 20 e 30 minutos, pelo que a maior fiabilidade do sistema só é alcançada depois deste período, contudo têm vindo a ser estudadas formas de diminuir o tempo de convergência desta técnica [12].

Este serviço de correção necessita de um número muito menor de estações base, isto porque não sendo um serviço diferencial como o RTK, em vez de necessitar de apenas funcionar nas proximidades de uma destas estações, este serviço tem uma rede de estações espalhadas pelo mundo, de forma a ser um serviço globalmente disponível e caracterizado não por determinar a posição relativa

a uma estação, mas sim pela determinação da posição absoluta. Atualmente a rede de estações espalhadas a nível global contém entre 50 a 100 unidades de referência e a informação de correção determinada é mundialmente distribuída através de 7 satélites geoestacionários. Na Figura 2-2 é apresentado um planisfério onde estão representadas com pontos vermelhos as estações base de referência e a diferentes cores as áreas de cobertura de cada satélite geoestacionário pertencente à rede de satélites do sistema Fugro da empresa OmniSTAR, uma empresa mundialmente reconhecida pelas suas fortes investigações em sistemas de correção GNSS[13].

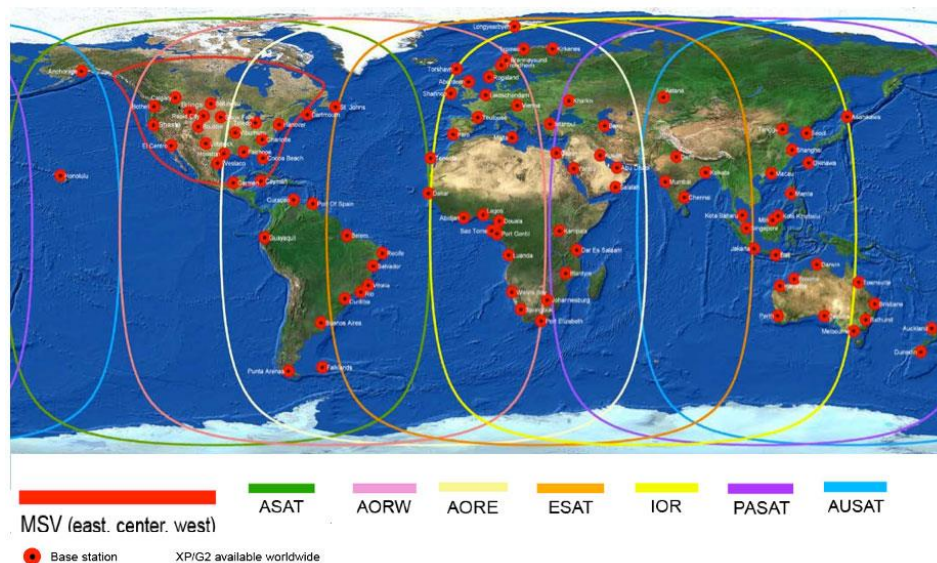
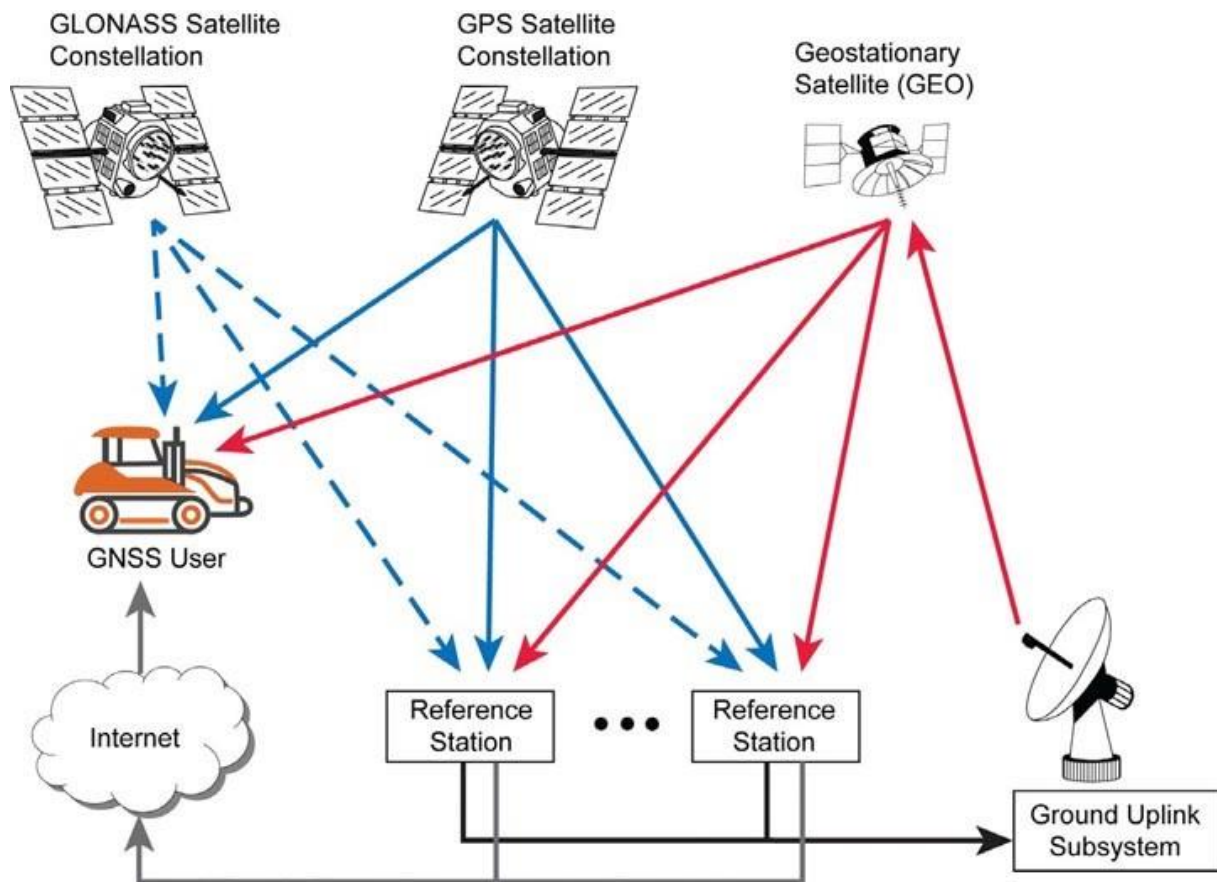


Figura 2-2 Cobertura Satélites PPP

A Figura 2-3 representa esquematicamente a arquitetura do funcionamento do PPP. As estações de referência processam a informação dos satélites de várias constelações e *a posteriori*, com base nos erros associados às mediações das posições das estações base calculam os fatores de correção. Estes fatores são calculados na central de operação do serviço PPP, que tira partido da utilização de algoritmos complexos aliados à técnica de filtros de Kalman[14]. Findada a determinação periódica das correções, estas são emitidas pelas antenas das estações base para o complexo de satélites geoestacionários responsáveis pela reemissão dos sinais de correção para os utilizadores finais. É ainda importante referir que este serviço de reemissão do sinal é operado em UHF, mais propriamente, na região de frequências da banda L e emitido por satélites.

*Figura 2-3 Sistema PPP*

Resumindo, o PPP tem uma série de vantagens associadas[15], como por exemplo o facto de não ser necessária uma estação base nas proximidades do utilizador, ao mesmo tempo que dá a garantia da determinação de uma posição absoluta a nível global graças à rede de estações de referência. Este fator reduz os requisitos materiais e laborais, reduzindo assim também o seu custo e logística de funcionamento.

2.1.3 SBAS – Satellite Based Augmentation System

O SBAS[16] é um sistema crítico de segurança da aviação civil com cobertura a nível regional, ou em alguns casos, a nível continental. Este serviço é garantido por satélites geoestacionários que emitem a informação de correção.

Este sistema compensa algumas desvantagens associadas ao serviço GNSS em termos de precisão, integridade, disponibilidade e continuidade, de forma a que mediante a utilização das informações provenientes dos dois serviços seja atingida uma performance estável e fiável de determinação da posição. O funcionamento geral deste serviço é apresentado na Figura 2-4, onde é possível verificar a arquitetura do sistema[17], assim como as diferentes fases e componentes do sistema de correção SBAS.

SBAS Architecture

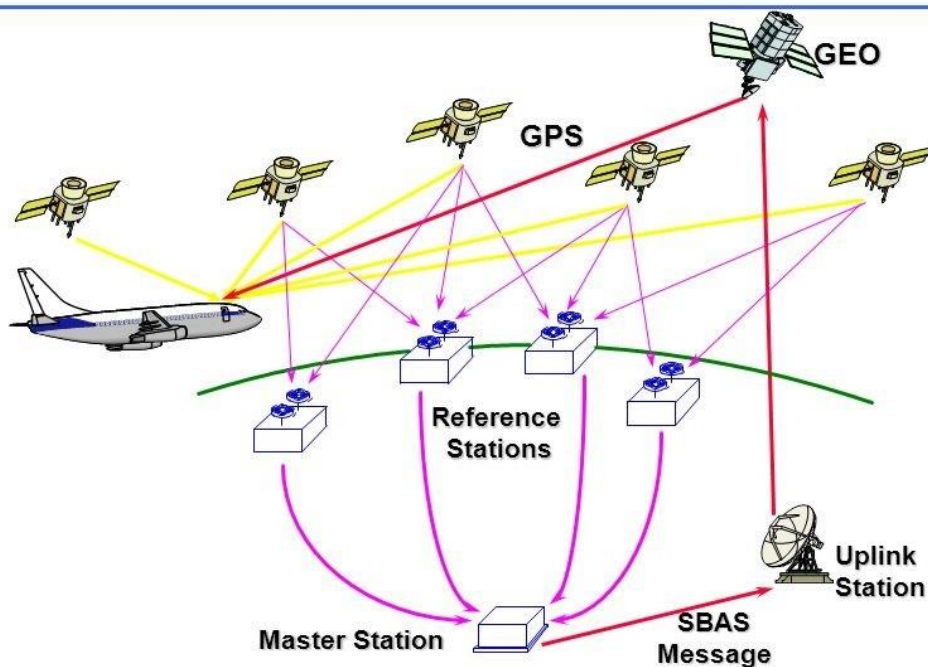


Figura 2-4 Sistema SBAS

A nível da infraestrutura terrestre, este serviço necessita também de algumas estações que recebem o sinal das principais constelações GNSS, para que seja processado no Centro de Processamento que essencialmente computa a integridade do sinal, as correções a diferentes níveis e a distância dos satélites. Atualmente a cobertura, como é possível verificar na Figura 2-5[18], é garantida

em apenas alguns países/regiões, pois este serviço necessita de suporte local, e uma central por si só não é capaz de processar as correções para todo o globo. É então observável que na América do Norte o suporte seja garantido por um serviço denominado por WAAS (*Wide Area Augmentation System*), na Europa seja garantido pelo EGNOS (*European Geostacionary Navigation Overlay Service*), na Índia pelo GAGAN (*GPS and GEO Augmented Navigation*) e por fim no Japão pelo MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*). Há ainda algumas empresas privadas que fornecem também este serviço, de forma paga, como por exemplo a OmniSTAR®.



Figura 2-5 Cobertura Sistemas SBAS

Findado o processo de determinação de erros e os ajustes a fazer para os compensar, ambos associados às medições dos satélites GNSS, as correções calculadas são então enviadas aos utilizadores do serviço SBAS, numa mensagem conhecida como “*SBAS Message*”[19]. Esta mensagem tem um formato *standard* e contém informações sobre:

- Órbitas dos satélites e correções dos relógios utilizados nos sistemas de GPS e GNSS e estimativas dos erros associados aos satélites (UDRE – *User Differential Range Errors*);
- GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*);
- Correções troposféricas.

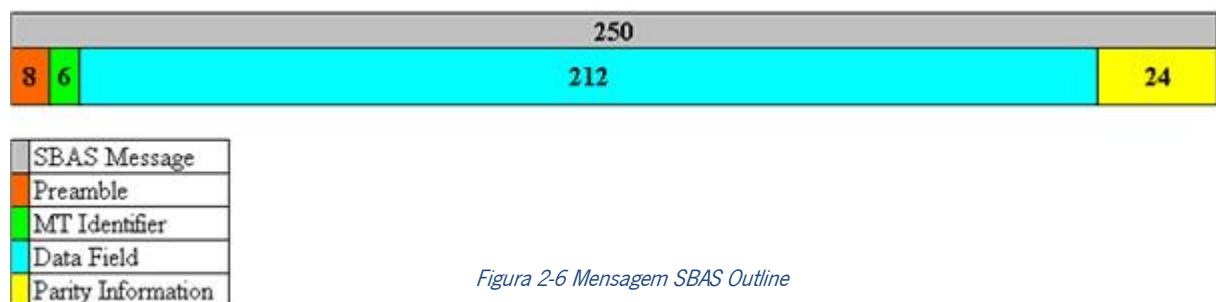


Figura 2-6 Mensagem SBAS Outline

É ainda importante reafirmar que estas mensagens são emitidas por satélite, 1 vez a cada segundo e com um *bitrate* de 250 bps. A estrutura da mensagem SBAS é representada pelo esquema patente na Figura 2-6.

É então observável que a mensagem é composta por 4 componentes distintas: a primeira parte da mensagem, composta por 8 bits de informação é denominada por preâmbulo e esta é uma combinação única de bits, que serve para garantir sincronização entre recetor e emissor e também para resolver ambiguidades. A segunda parte da mensagem (*Message Type Identifier*), e como o nome indica, é um identificador do tipo de mensagem e é composta por 6 bits, pelo que pode identificar até 64 tipos de mensagem. Apesar de apenas serem definidos 20 tipos até ao momento, isto é necessário porque o sistema de correção SBAS garante uma série de informações diversificadas sobre compensações a aplicar em vários fatores que afetam a precisão de localização. A título de exemplo, o identificador de mensagem com o valor 6, está associado a informações de integridade, ao passo que o identificador 17 indica que a mensagem é relativa aos satélites GEO (*Geostationary Earth Orbit*). Os 212 bits que seguem o Identificador contêm diferentes correções e informações de integridade que dependem do tipo de mensagem. Por fim, os últimos 24 bits da mensagem SBAS são relativos à paridade da mensagem e têm como objetivo a proteção de erros na receção e/ou leitura da informação, que pode causar erros na correção do sinal GNSS.

Ultimando, o sistema SBAS é bastante complexo e por isso implica uma simbiose entre uma série de camadas funcionais que o constituem para que o serviço seja fiável e funcional em tempo útil para o utilizador do mesmo.

A primeira das camadas é chamada por *Space Segment* e é responsável pela transmissão da informação de correção aos utilizadores e a seu encargo estão os satélites geoestacionários.

A segunda camada é denominada por *Ground Mission Segment* e o seu principal objetivo é a geração e transmissão aos satélites GEO do sinal de correção. Esta camada é constituída por uma rede de estações de monitorização que monitoriza os satélites GNSS e características associadas, assim como as propriedades da ionosfera. Pertence também a esta camada um centro de processamento que analisa toda a informação gerada pelas estações de monitorização e, partindo desta, faz uma estimativa das correções a aplicar aos satélites e do modelo da ionosfera e formata esta informação nos *standards* das mensagens SBAS, tendo assim o papel mais importante e complexo de todo o sistema SBAS. Faz ainda parte deste segmento o centro de controlo dos satélites GEO, que é responsável por emitir aos satélites a informação calculada no centro de processamento. Há ainda uma outra componente, denominada por

camada de comunicação, que garante que todas as entidades do *Ground Mission Segment* estão conectadas em tempo real.

A terceira camada é conhecida por *Support Mission Segment* e esta está encarregada pela coleta de todos os elementos necessários para o desenvolvimento e suporte de um sistema SBAS. Estes elementos não estão diretamente relacionados com a prestação do serviço de correção, contudo são necessários como instalações de suporte externo. Basicamente, as necessidades às quais este setor responde estão relacionadas com as fases de planeamento, desenvolvimento e validação do sistema SBAS, certificação de qualidade e de aplicações e ainda pela manutenção e solução de problemas que eventualmente surjam.

Por fim, a quarta e última camada é conhecida por *User Segment* e esta engloba todo o equipamento que o utilizador do serviço SBAS necessita para adquirir e processar o SiS (*Signal in Space*). Este segmento não é conduzido pelo provedor do serviço SBAS, mas sim pelo mercado de aplicações SBAS.

2.2 Recetores Comerciais de Sinal de Correção GNSS

Nesta subsecção serão apresentados recetores do sinal de correção GNSS atualmente comercializados, assim como algumas das suas características e tipos de correção previamente abordadas que estes conseguem receber e processar. É importante referir ainda que alguns destes dispositivos são dedicados e recebem exclusivamente a informação de correção para pós-processamento da localização mediante os dados de correção, ao passo que existem ainda antenas que envolvem no seu funcionamento a aquisição não só do sinal de correção como também dos sinais GNSS, tendo assim a capacidade de determinar a posição com grande precisão graças à capacidade de processar a informação de localização e de correção em tempo real.

2.2.1 Hemisphere® AtlasLink™ GNSS Smart Antenna

A empresa Hemisphere GNSS lida com sistemas de posicionamento por satélite de alta performance e desenvolve ainda soluções personalizadas para cada cliente e/ou cada problema, relacionadas com sistemas de posicionamento e/ou correção de um sistema de posicionamento. O desenvolvimento interno passa pela criação de hardware, software e uma gama de serviços para que o produto seja o mais indicado a cada situação.

As soluções GNSS desta empresa são focadas em atividades marítimas, topológicas, agrícolas e de construção, contudo, os seus produtos são aplicáveis em qualquer tipo de atividade que necessite de alta precisão de localização.

No âmbito das correções GNSS a empresa desenvolveu o sistema Atlas™ Global Correction Service[20], um sistema de correção que procura abranger todo e qualquer utilizador em (quase) qualquer área do mundo, a cobertura abrange todas as áreas entre 75°N e 75°S e é observada na Figura 2-7.

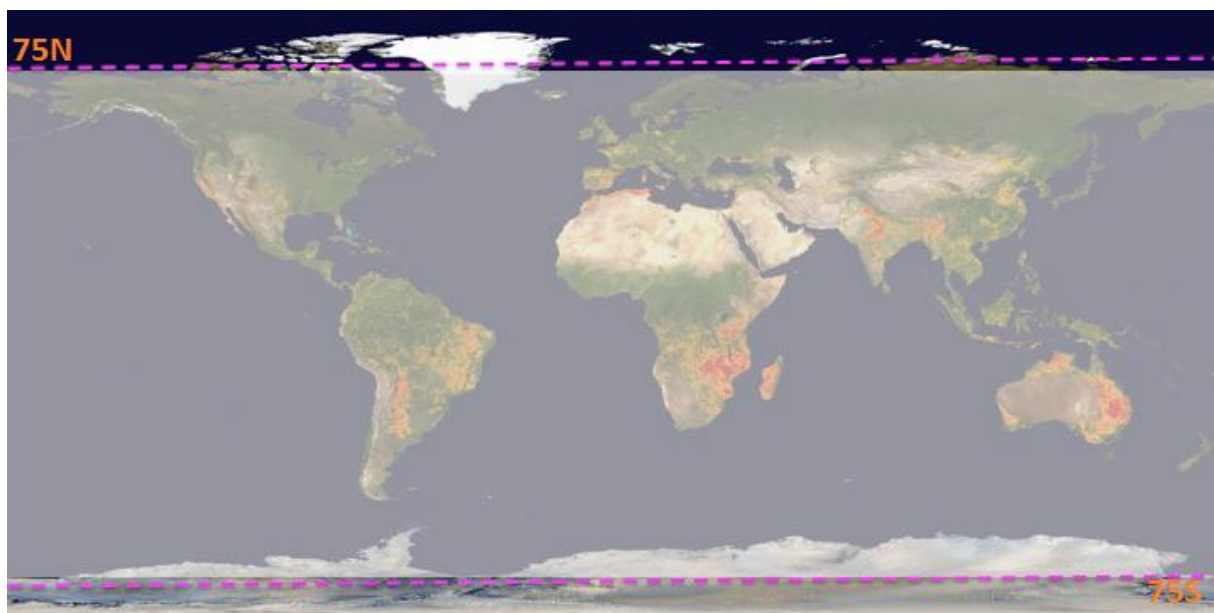


Figura 2-7 Cobertura Sistema Atlas

O sinal de correção do serviço Atlas é garantido por mais de 100 estações GNSS espalhadas pelo mundo, cuja data coletada por estas é utilizada para calcular a informação sobre erros associados a órbitas dos satélites e ainda dos relógios. Esta informação é então codificada no formato das mensagens Atlas e são emitidas por satélites na L-Band ou alternativamente são ainda transferidas pela Internet.

O funcionamento geral do sistema Atlas, que é baseado na técnica PPP, é apresentado na Figura 2-8, apresentando o fluxo de informação entre a cadeia de entidades presentes no seu sistema. A informação adquirida nas estações de referência é enviada ao centro de controlo e este encarrega-se pelo cálculo das correções a aplicar às informações provenientes dos satélites GNSS. Posto isto, o centro de controlo envia estas informações às instalações de comunicação com os satélites GEO, que garantirão o seu reenvio por L-Band aos utilizadores. O centro de controlo, alternativamente coloca também as informações de correção na internet, de forma a que os utilizadores que pretendam usar este meio de comunicação em vez dos satélites possam também ter acesso ao serviço de correção.

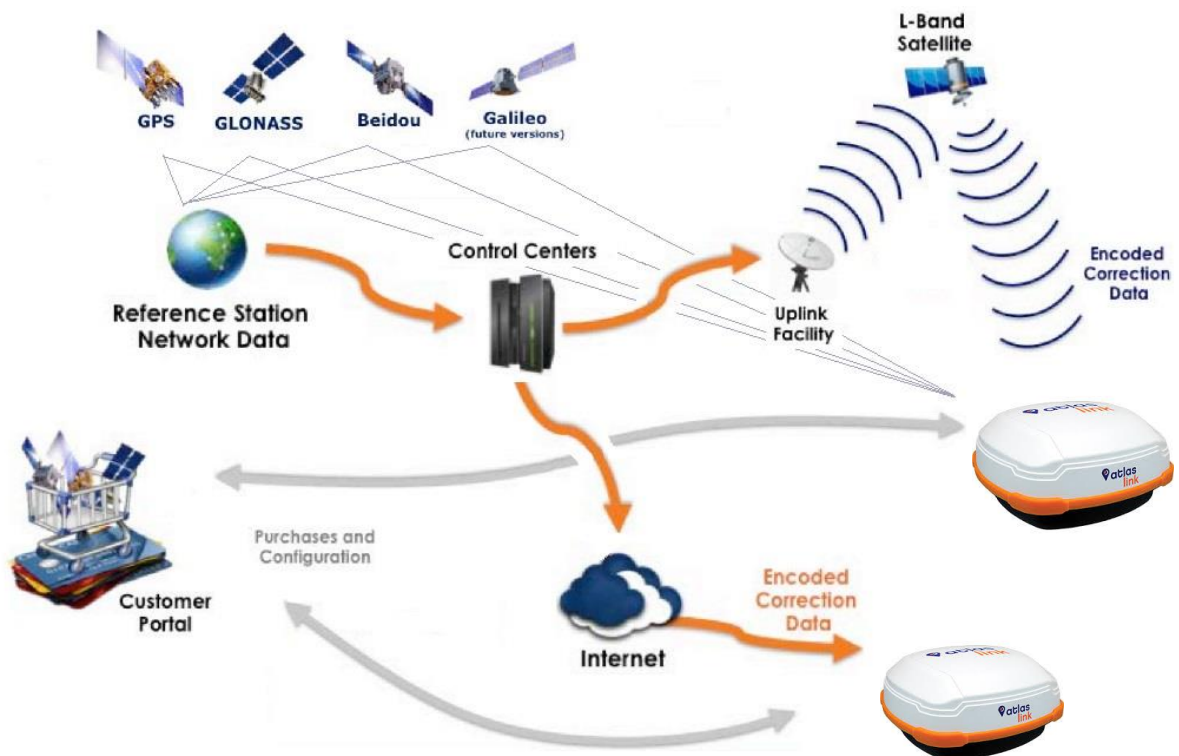


Figura 2-8 Sistema Atlas

O portal de cliente serve para que os utilizadores do serviço possam configurar os seus dispositivos, associar novos equipamentos à subscrição e que possam ainda comprar diferentes versões de *firmware*, o que influencia diretamente a precisão de localização a ser alcançada com a correção. Isto é necessário porque o serviço Atlas disponibiliza várias opções de subscrição, com características intrinsecamente diferentes.

O mais recente produto da Hemisphere é a antena AtlasLink™ GNSS Smart Antenna[21]. Esta é uma antena capaz de adquirir várias frequências na gama UHF ao mesmo tempo, adquirir e desmodular informação de vários satélites da constelação GNSS e ainda capaz de receber informações do serviço de correção global GNSS Atlas.

A antena AtlasLink é um dispositivo dotado de várias características, nomeadamente:

- Usa o mecanismo Athena GNSS, também da Hemisphere, uma antena GNSS de alta performance e resultados provados empiricamente;
- Capacidade de receção e aplicação das correções determinadas pelo serviço Atlas Global Correction Service;

- Disponibilização do serviço Atlas Web UI, uma interface de configuração e monitorização que o utilizador pode facilmente aceder através de um dispositivo com acesso a redes de internet sem fios ou ainda por Bluetooth;
- Memória interna para armazenamento de dados e downloads e capacidade de fazer upload dos dados armazenados;
- A carcaça foi desenvolvida para aguentar os ambientes mais agressivos e hostis, podendo assim ser utilizada em qualquer situação e/ou lugar do mundo.

A Figura 2-9 abaixo demonstra o aspeto exterior desta antena.



Figura 2-9 AtlasLink Smart Antenna

Através do portal Web Atlas é possível configurar a antena AtlasLink, através de uma subscrição do serviço de correção Atlas em 3 níveis de precisão de determinação de posição, são eles: H100, H30 e H10, com precisões de 1m, 30cm e 8cm respetivamente, que só são alcançáveis graças à junção da tecnologia da antena GNSS Athena ao serviço Atlas, tudo num único dispositivo.

Esta antena inteligente suporta vários tipos de protocolos de comunicação, como WiFi, CAN (*Controller Area Network*), NMEA 0183 e NMEA 2000 para comunicação com outros dispositivos. Como já foi antes referido, este dispositivo é ainda capaz de criar uma rede WiFi para comunicação sem fios com outros dispositivos, que usualmente é utilizado para transferência de dados e para assegurar a comunicação com a interface de utilizador.

Em termos elétricos, esta antena é passível de ser alimentada por uma tensão de operação no intervalo de 7-32 Volt, com modo de funcionamento de paridade inversa, pelo que além de permitir uma vasta gama de fontes de alimentação, ainda acaba por tornar o sistema seguro e à prova de flutuações e erros de alimentação. O consumo nominal de corrente, enquanto adquire as bandas de GPS - L1 ou

L2, Glonass - L1 e L2, Beidou - B1, B2 ou B3 e ainda a Banda L de correção, é de aproximadamente 0.4 Ampere, que se traduz numa potência nominal de operação de 5.4 Watt.

A antena é ainda capaz de utilizar o sistema RTK para se autocalibrar, de forma rápida e eficaz. Para variações de inclinação de posição, a estrutura é capaz de responder autonomamente com uma correção graças aos sensores de *tilt*, integrados no sistema.

A antena AtlasLink tem ainda duas características especiais que aumentam o seu dinamismo e cenários de aplicação, fazendo chegar o serviço de correção ao maior número possível de utilizadores interessados em obter altas performances e precisões de localização. Este objetivo abrange até utilizadores de produtos de receção dos sinais GNSS que não são fabricados pela empresa criadora do serviço Atlas, a Hemisphere.

A primeira dessas características é denominada por SmartLink™ e esta consegue fazer com que a antena AtlasLink seja capaz de enviar o sinal de correção Atlas a dispositivos externos. Esta comunicação dá-se através de um protocolo de mensagens *standard* e conhecidas pela maioria dos recetores GNSS, como por exemplo o protocolo RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*). A Figura 2-10 demonstra o funcionamento desta tecnologia. Neste *setup* a antena inteligente funciona como um recetor do serviço Atlas, que pode ser utilizado em simultâneo com o recetor GNSS do utilizador, que pode ser de qualquer marca, e assim garante o serviço de correção por L-Band a um dispositivo que antes não a tinha, e por isso não conseguia atingir níveis de precisão de localização tão bons.

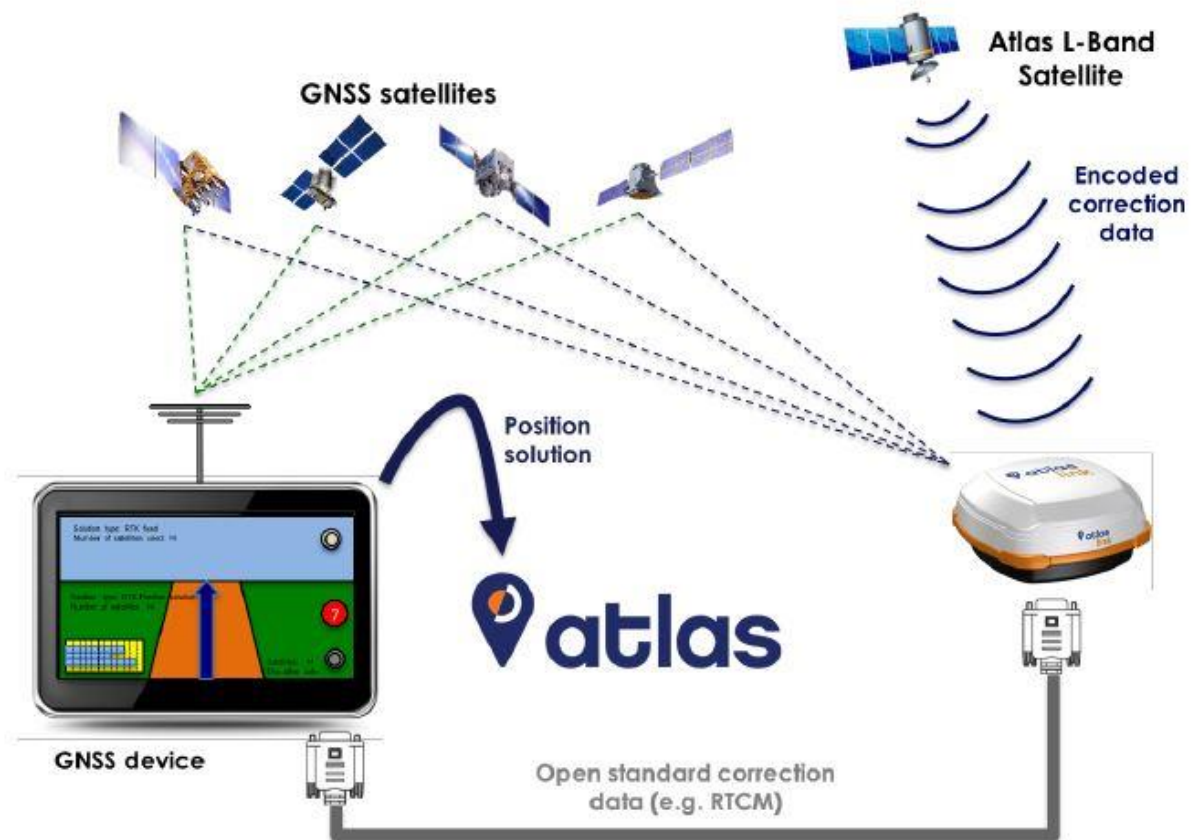


Figura 2-10 Atlas SmartLink

A segunda tecnologia deste género implementada na *Smart Antenna* trata-se do sistema BaseLink™, que mais não é que uma simulação de um ambiente RTK, ou seja, a antena AtlasLink estabelece-se como um ponto de referência do nível de precisão de uma estação base RTK, acabando por poder ser utilizada para esse efeito em vez de uma real estação base com coordenadas bem conhecidas, como o sistema RTK exige. Isto permite que um sistema que utilize a correção RTK possa usufruir de uma boa correção, mesmo estando fora do alcance de uma dessas estações de referência. Em termos práticos, após uma configuração em modo BaseLink, a AtlasLink Antenna passa por um processo intensivo de determinação da sua localização, e após alguns minutos de coleta de informação dos sinais de GNSS e dos sinais de correção do serviço Atlas, a antena determina as suas coordenadas com precisão e emite constantemente esta informação para o dispositivo de localização que se desloca nas redondezas. A Figura 2-11 abaixo demonstra este processo:

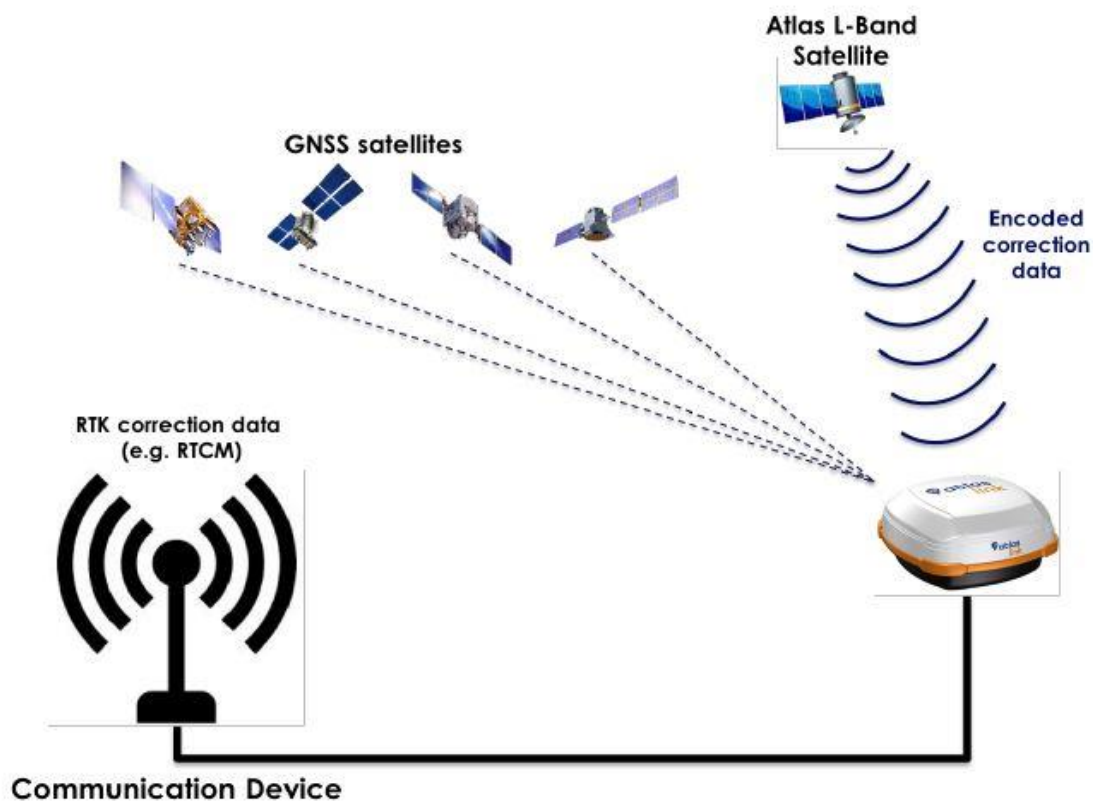


Figura 2-11 Atlas BaseLink

De um modo geral, o serviço garantido pela empresa Hemisphere é bastante dinâmico e permite aos utilizadores dos serviços de localização e correção GNSS um acesso simples e eficaz a esta gama de serviços, para que obtenham cada vez melhores resultados nas suas atividades graças à melhoria significativa na precisão e fiabilidade no que toca à determinação da posição.

É ainda importante referir a facilidade com que qualquer recetor GNSS pode ser ligado à antena AtlasLink, de forma a obter a melhor precisão de localização possível, a níveis que chegam a ser subdecimétricos e que podem mesmo chegar aos 4cm de resolução. As suas características únicas e inovadoras elevam esta antena ao estado de arte em performances de localização associadas a sistemas GNSS. O dinamismo deste sistema é patente na Figura 2-12 que se segue, e a este estão associados fatores únicos como a quantidade de constelações de satélites utilizados, a variedade de subscrições e serviços presentes no Atlas Web Portal, os dois meios de comunicação da informação de correção (L-Band e Internet) e ainda o facto de qualquer dispositivo GNSS se poder ligar a esta antena de forma a obter melhores performances de posicionamento. A acessibilidade deste sistema torna-o passível de ser

utilizado em qualquer parte do mundo, mesmo onde nenhum outro teve sucesso, e os resultados de performance em relação a competidores são bastante positivos, tanto a nível de precisão de localização como a nível do tempo de convergência até atingir estabilidade.

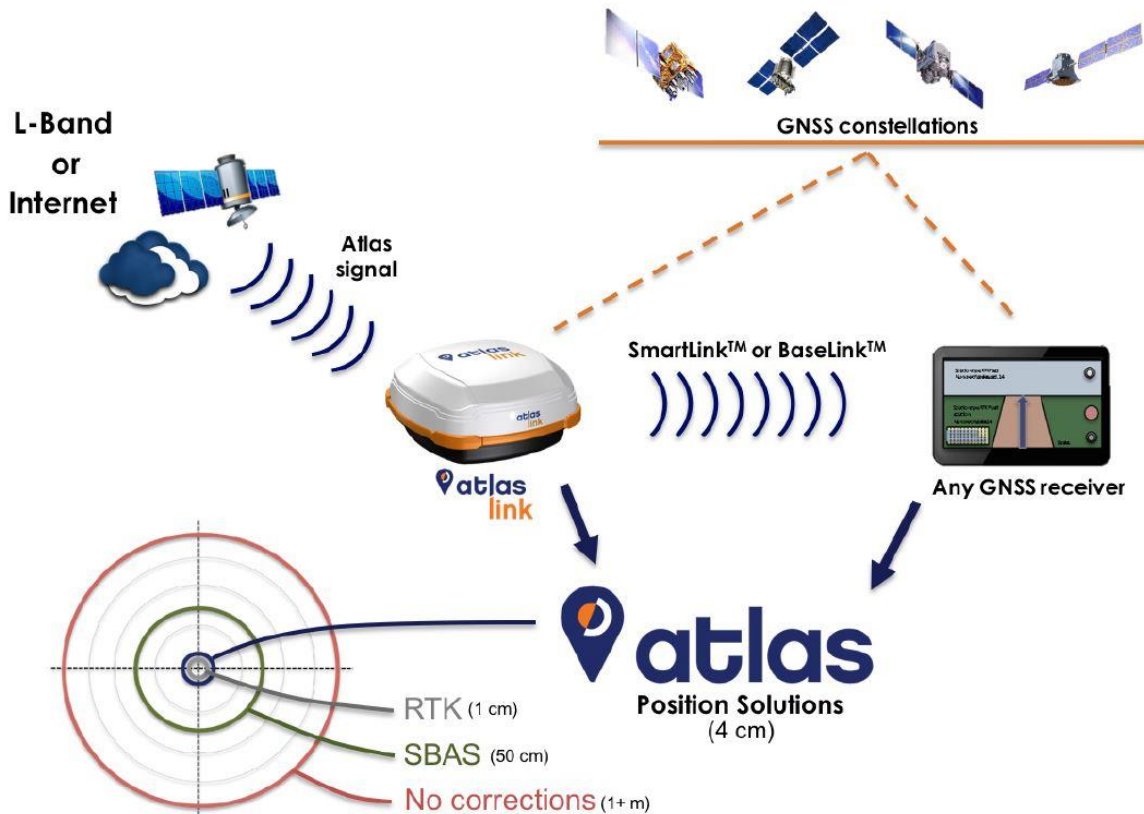


Figura 2-12 AtlasLink + Atlas Overview

2.3 Conclusão do Estado da Arte

Feito um estudo sobre o estado da arte relativo aos sistemas de correções existentes, é possível inferir algumas conclusões sobre características a integrar no módulo de receção do sinal de correção GNSS para integrar no sistema APP.

De forma a obter uma cobertura de sinal em qualquer posição do globo o recetor de sinal GNSS deve ser capaz de adquirir e processar sinais vindos de diversos meios de comunicação, ou de pelo menos um deles e que deve ser o mais abrangente. O primeiro destes sinais, e associado à técnica de correção RTK, seria então o protocolo RTCM[22] que é utilizado pelas estações base de forma a enviarem a sua posição como mais uma referência para determinação da posição, por outro lado era também conveniente que o módulo de correção GNSS do sistema APP fosse também capaz de estabelecer uma ligação à Internet porque há também informações de correção disponíveis, associadas aos sistemas SBAS e PPP, para download através de um serviço web, por fim o recetor deveria também ser capaz de

receber sinais L-Band emitidos por satélites geoestacionários já que também é um meio de comunicação de sinais de correção GNSS.

Das 3 opções apresentadas, a solução escolhida foi a capacidade de adquirir e desmodular o sinal L-Band proveniente dos satélites GEO. A principal razão que levou à escolha por este método de receção é a sua área de cobertura, que atualmente e graças a uma rede significativamente grande de satélites GEO é quase global. Estima-se que os sinais emitidos por estes satélites, sejam alcançáveis em qualquer ponto do globo, excetuando as zonas polares.

A não inclusão do sistema de comunicação RTCM é facilmente explicada, em primeiro lugar, a técnica de correção GNSS RTK, apesar de conseguir a melhor performance de localização nas redondezas das estações base, carece ainda bastante de um maior número de antenas para que a abrangência deste serviço seja maior. Na Figura 2-13[23] que se segue é possível verificar a carência de zonas abrangidas por este serviço, a título de exemplo, no continente Europeu. O sistema APP tem como objetivo principal uma precisão de localização extremamente elevada em qualquer parte circulável do mundo, a utilização do sistema de correção RTK impossibilitava este rigor de determinação de posição em zonas não abrangidas pelo raio de cobertura das antenas base, o que é claramente insuficiente para o objetivo. Desta forma não é compensatório, para já, incluir um sistema de receção RTCM já que este não traria vantagens a nível global e seria um extra a implementar no módulo.

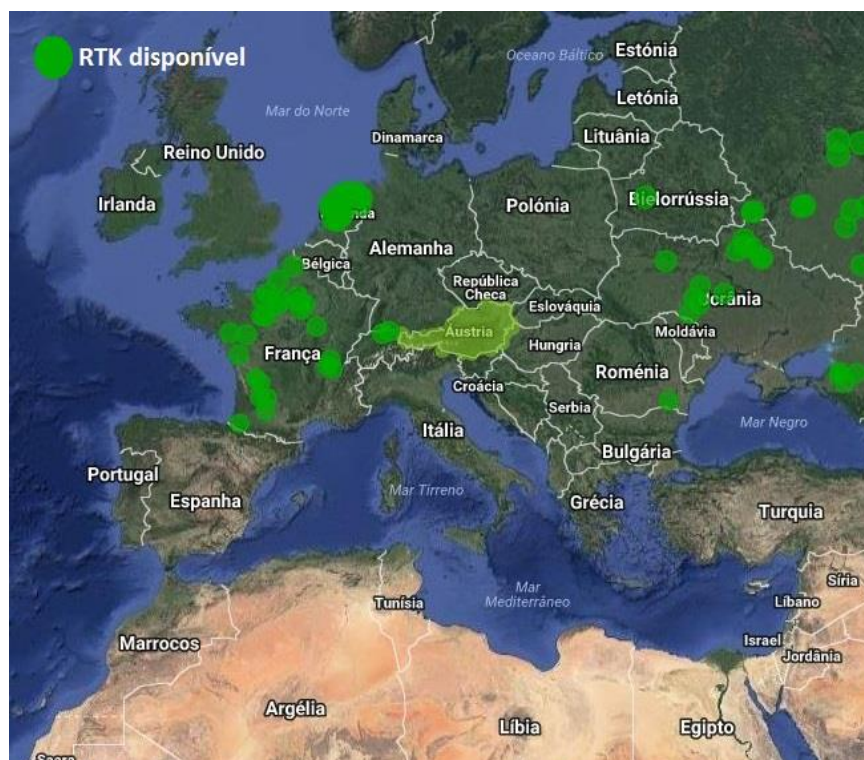


Figura 2-13 Cobertura RTK

É então natural apresentar como melhor solução para o sistema APP um recetor do sinal de correção de GNSS proveniente de satélites geoestacionários, a emitir na gama de frequências da L-Band. Desta forma, optou-se pela construção de um módulo capaz de adquirir e desmodular um sinal de frequência ultra alta, modulado em BPSK, emitido por satélite e por isso contando também com uma atenuação significativa graças à longa distância percorrida, através da atmosfera terrestre. O seguinte capítulo, apresenta algumas considerações teóricas a ter sobre modulações e desmodulações em conta na construção do sensor, e na programação do mesmo de forma a obter um algoritmo eficaz de desmodulação BPSK.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados conceitos, essencialmente sobre processamento de sinal que são pertinentes na construção de um recetor de L-Band.

Em primeira instância serão apresentadas as diferentes técnicas de modulação digital de sinais, e a cada uma delas serão expostas vantagens e desvantagens associadas, assim como os cenários de aplicação onde estas são mais usadas.

Posto isto, será aprofundada a técnica de modulação BPSK, a mais comum nos sinais provenientes de satélites [6].

Em seguida serão apresentados alguns conceitos de combinação de sinais, a fim de entender da melhor forma quais os passos necessários para a criação de um desmodulador apropriado a cada situação, apresentando em seguida um exemplo de um desmodulador BPSK bem conhecido, o Costas Loop [24].

Por fim, será explicado o funcionamento de um sintonizador rádio que é necessário numa primeira instância de receção do sinal. Este será utilizado como um conversor para uma frequência intermédia, já que a frequência do sinal é demasiado alta, dificultando o processamento deste por dispositivos eletrónicos digitais.

3.1 Modulação Digital de Sinais

A comunicação[25] é um processo de transmissão de informação de qualquer tipo, entre duas ou mais entidades, através de um meio físico, segundo um protocolo conhecido pelas duas entidades. Há uma enorme quantidade de formas de comunicação, pelo que é impossível referir aqui todas elas.

No processo de comunicação, a informação é confinada numa mensagem, ou seja, uma manifestação física da informação produzida na fonte de informação e isto permite a libertação de ambiguidades associadas à informação. O objetivo da comunicação é que o destinatário da informação consiga receber a mensagem e consequentemente reproduzir a partir dela a informação. Para isso, entre fonte e destinatário de informação tem de existir um sistema de comunicação encarregado pela transmissão das mensagens. Na Figura 3-1 é verificável um esboço deste processo.



Figura 3-1 Esboço de um Sistema de Comunicação Generalista

Nos dias de hoje, e há já algumas décadas, as investigações no ramo das comunicações incidem sobre sinais elétricos e/ou eletromagnéticos. Neste âmbito o desafio que se vive é garantir altos débitos de dados, ao mesmo tempo que são ultrapassados problemas de congestão espectral e interferências ou ruídos dos canais de comunicação. Uma solução atualmente utilizada para transmitir mensagens a longas distâncias e de forma a evitar ruído e ainda contendo muita informação graças a um bom *bitrate*, é a técnica de modulação de sinais.

A modulação[26] trata-se de uma combinação entre um sinal de frequência elevada, denominado de onda portadora, com um sinal que contém a informação a ser transmitida, de frequência mais baixa. A Figura 3-2 representa o processo de modulação.

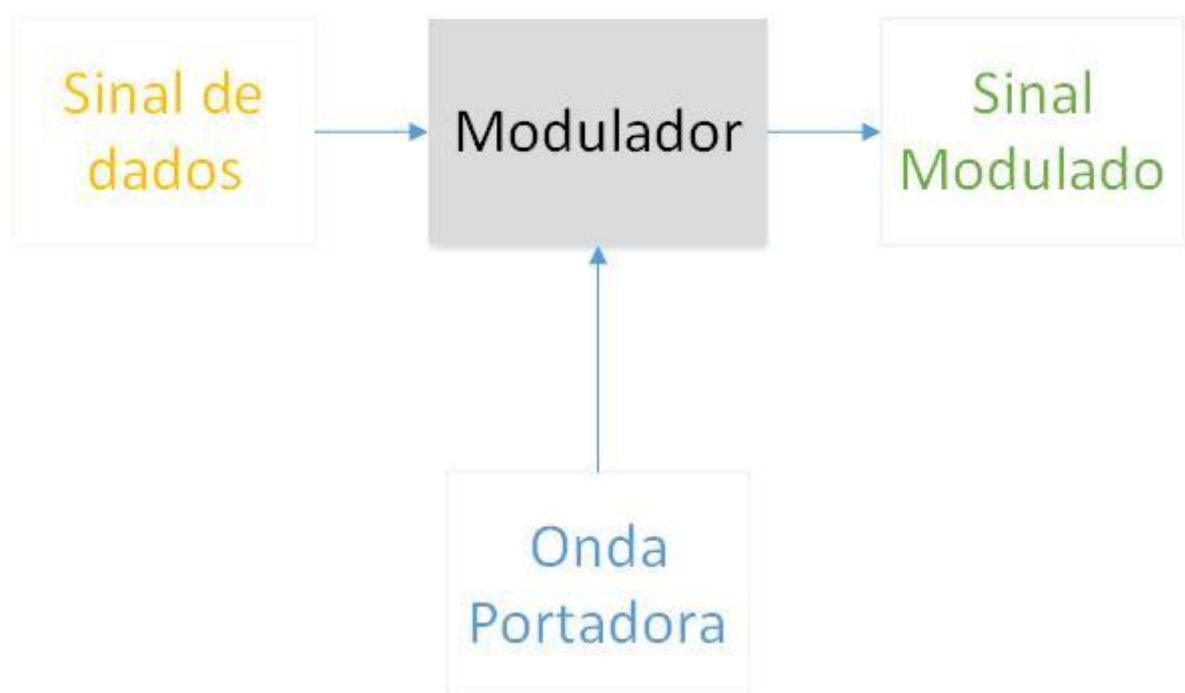


Figura 3-2 Sistema de Modulação Generalista

A modulação pode ser analógica ou digital, e para cada um destes tipos há uma série de técnicas de modulação. Uma modulação analógica dá-se quando a onda portadora é combinada com um sinal

contínuo no tempo ao passo que uma modulação digital se trata da combinação da onda portadora com a representação temporal de um sinal discreto no tempo.

Atendendo que a maior parte da investigação nos últimos tempos tenha incidido sobre modulações digitais e o objeto de estudo desta dissertação está também relacionado com modulações digitais, apenas estas serão apresentadas.

3.1.1 ASK – Amplitude Shift Keying

Na modulação ASK, os bits são codificados em amplitude, ou seja, para um bit de valor 1 a amplitude da onda modulada tem um certo valor e para um bit de valor 0 a onda modulada tem um valor de amplitude diferente. Na Figura 3-3 pode-se observar um exemplo deste tipo de modulação.

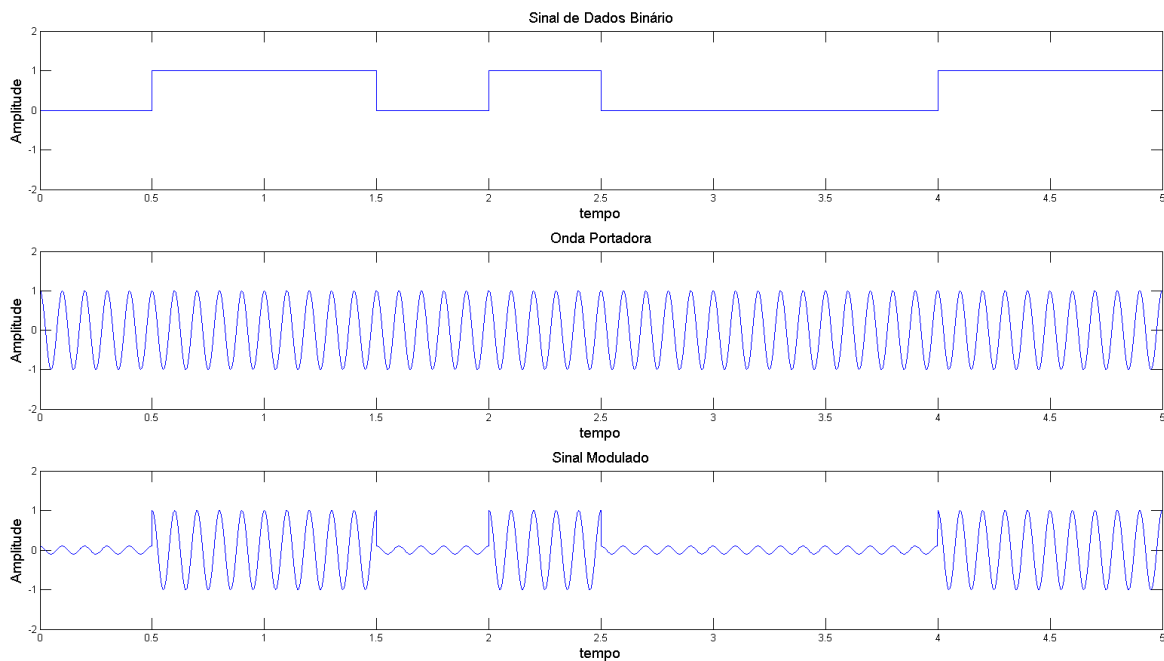


Figura 3-3 Modulação ASK

Esta técnica é principalmente utilizada em comunicações por fibra ótica, onde o emissor emite um pulso forte de luz quando quer representar um bit a 1 e um pulso de baixa intensidade quando a intenção é a representação de um bit a 0.

Este método apresenta como vantagem a simplicidade de implementação, e como desvantagem a baixa imunidade a interferências.

Ainda relacionado com este método de modulação surge a modulação OOK (*On-Off Keying*), uma abordagem ainda mais simples, onde a presença de uma onda numa determinada frequência indica um bit a 1 e quando não é verificada a presença dessa onda é representado um bit a 0. A Figura 3-4 demonstra o funcionamento deste tipo de modulação.

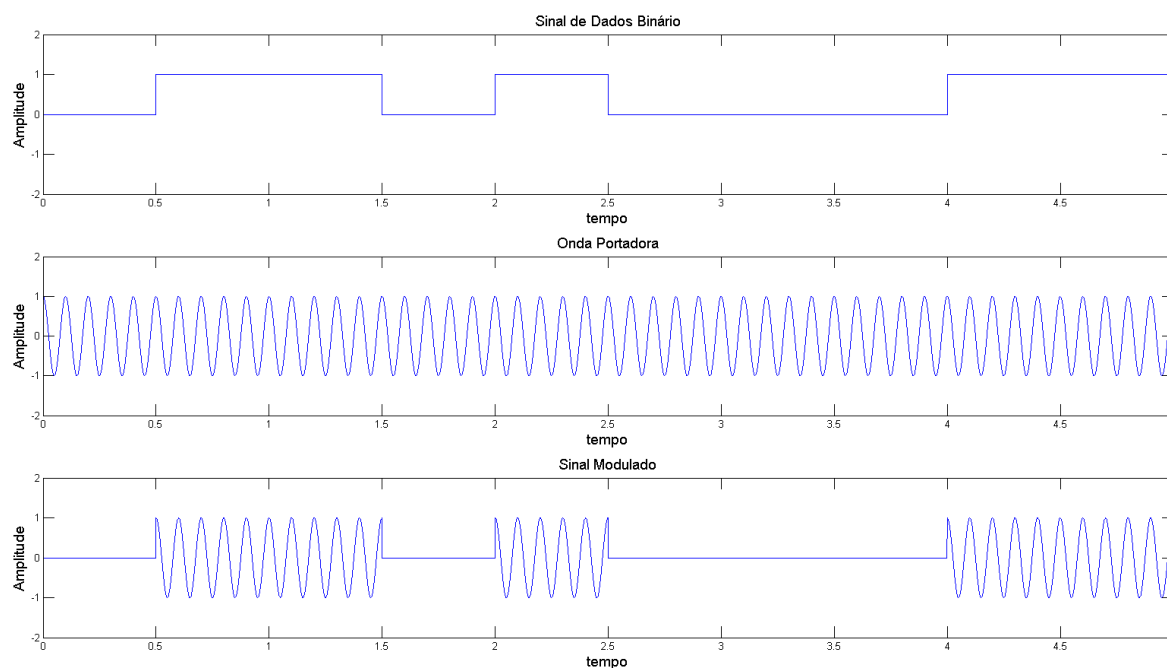


Figura 3-4 Modulação OOK

Este tipo de modulação só pode ser usado em ambientes bem controlados e de baixo ruído, já que apresenta uma suscetibilidade ainda maior a erros por interferências e ruídos do que o modelo ASK. Isto acontece porque a presença de um pequeno ruído pode ser interpretada como um bit a 1, quando na verdade representaria um bit a 0.

3.1.2 FSK – Frequency Shift Keying

Neste tipo de modulação, a variável que varia consoante o valor do bit é a frequência do sinal, ou seja, na representação de um bit a 1, o sinal de dados é representado por uma determinada frequência e para um bit a 0 o sinal de dados é representado por um outro valor de frequência. A diferença entre os dois valores de frequência convém não ser nem muito pequena, já que isto tornaria difícil a distinção entre as duas no lado do recetor, nem muito grande, já que isto implicaria um aumento extremamente elevado na largura de banda, quer do lado do recetor como do emissor.

As principais aplicações desta tecnologia de modulação discreta de sinal são em modems antigos de baixo débito (até 1200bps), comunicações entre PLCs (*Programmable Logic Controller*), entre outros, e associada a esta técnica estão presentes vantagens como a facilidade de implementação no emissor, já que esta técnica não requer uma multiplicação de sinais e pode ser criada através de dois geradores de onda (frequência 1 e frequência 2) e um *switch* que controla qual das ondas é emitida, e ainda a maior imunidade a ruídos e interferências, quando comparada com a técnica ASK. A principal desvantagem deste método é a necessidade de uma maior largura de banda, já que são utilizadas duas altas frequências, em vez de uma frequência alta combinada com uma outra consideravelmente mais baixa. Este fator limita também os débitos possíveis, já que quanto maior o débito necessário, maior também a largura de banda que o sistema necessita.

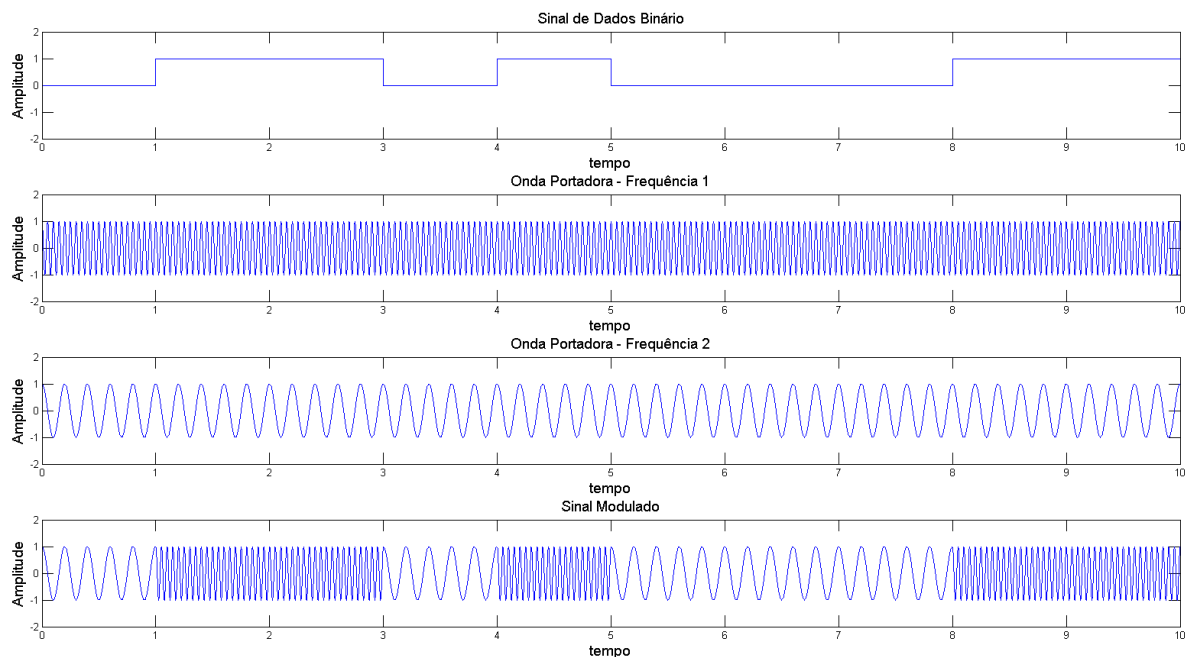


Figura 3-5 Modulação FSK

A Figura 3-5 a cima representa o funcionamento geral da modulação FSK, demonstrando a presença de duas ondas portadoras do sinal, que mediante a seleção de uma ou de outra em concordância com o valor do bit, formam o sinal modulado.

3.1.3 PSK – Phase Shift Keying

Uma outra técnica de modulação digital envolve como variável de modulação a fase do sinal modulado. Desta forma, quando a comunicação é binária existem dois símbolos (1 e 0), um desfasamento para cada um, e o processo chama-se BPSK. No diagrama IQ presente na Figura 3-6 que se segue, são apresentados os símbolos implicados neste tipo de modulação. Quando o desfasamento é de 0° , estamos perante um bit a 1 e quando o desfasamento toma o valor de 180° , é representado um bit a 0.

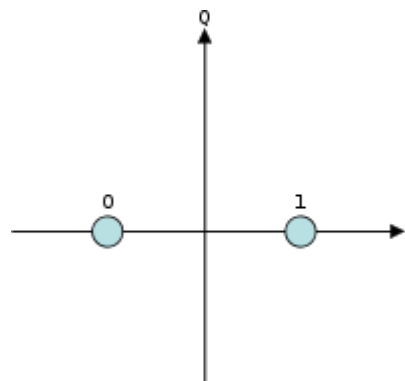


Figura 3-6 Diagrama de Constelação BPSK

A Figura 3-7 demonstra a resultante da modulação de um sinal binário em BPSK.

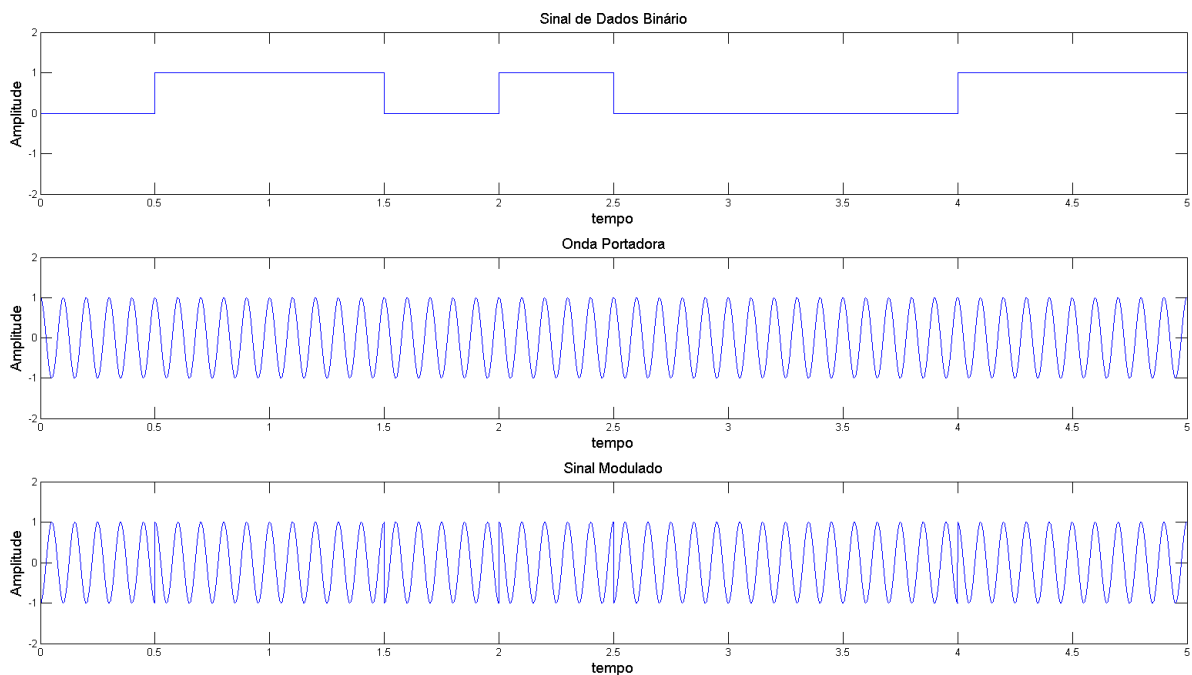


Figura 3-7 Modulação BPSK

A quantidade de símbolos a modular é variável, e em vez de dois símbolos apenas como na comunicação BPSK, podem ser modulados 2^n símbolos, e desta forma, o desfasamento entre símbolos é igual a $360^\circ/2^n$.

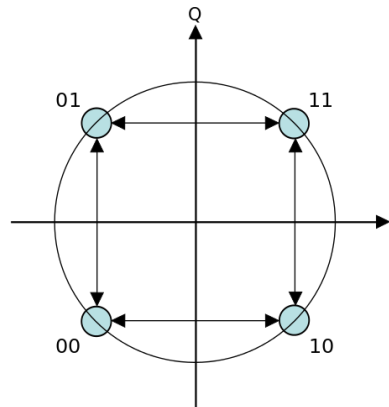


Figura 3-8 Diagrama de Constelação QPSK

A título de exemplo, é apresentada a técnica de modulação QPSK, onde o valor do desfasamento entre símbolos, em vez de 180° como é verificado na modulação BPSK, é igual a 90° . O diagrama de constelação IQ desta técnica de modulação está patente na Figura 3-8, e o resultado de uma modulação por este processo é representado na Figura 3-9, onde se podem ver variações de múltiplos de 90° no sinal modulado.

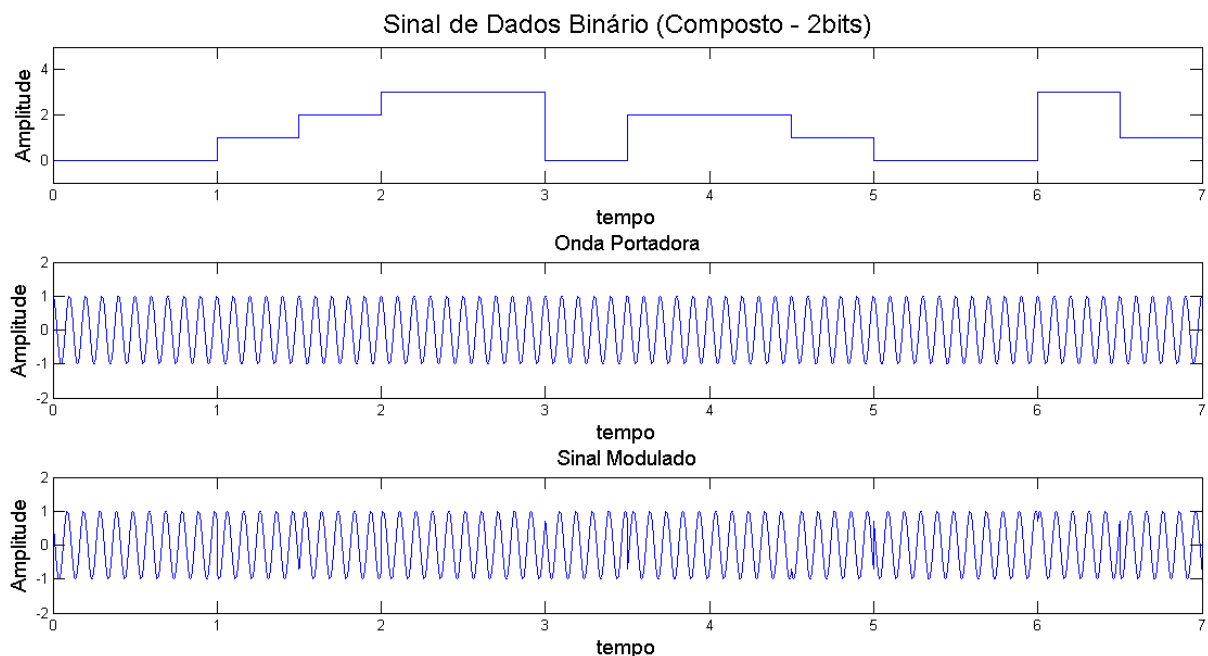


Figura 3-9 Modulação QPSK

As principais aplicações da modulação em fase são redes sem fios, Bluetooth, plataformas de processamento de identificadores por radiofrequência e comunicações por satélites.

Como vantagem este sistema apresenta a sua simplicidade e eficiência energética, assim como uma significativa imunidade a erros por interferência, já que a alocação de largura de banda é boa.

Como principal desvantagem, é destacada a ambiguidade presente na receção do sinal, e esta surge ligada à dificuldade em distinguir, numa situação de mudança de fase, se a transição é de um bit a 0 para um bit a 1, ou se é o contrário. Graças a esta ambiguidade, há necessidade de implementar um sistema de sincronização entre emissor e recetor, como por exemplo a introdução de um preâmbulo nas mensagens. Este fator implica uma maior complexidade no processo de desmodulação do sinal.

3.1.4 QAM – Quadrature Amplitude Modulation

A necessidade de altos débitos de transferência de dados implica a maior eficiência na alocação da largura de banda. Como resposta a esta necessidade surge a técnica de modulação QAM.

Contrariamente às técnicas de modulação previamente explicadas, em vez de a variável ser apenas uma (p.e.: frequência, amplitude ou fase), neste tipo de modulação cada símbolo é caracterizado por uma combinação única de amplitude e fase. Desta forma, no diagrama de constelação IQ, a modulação QAM pode ter uma série de símbolos tão grande quanto o desejado, desde que permita a correta avaliação de qual o símbolo representado. É conveniente que a determinação do número de bits por símbolo seja calculada pela fórmula 2^n , $n \in \mathbb{N}$, de forma a que o aproveitamento de bits seja o melhor possível. Atualmente são utilizadas versões desta técnica com 4096 símbolos, ou seja, por amostra, são transferidos 64 bits de informação. Nas seguintes Figura 3-10, Figura 3-11 e Figura 3-12, é possível observar diagramas de constelação IQ para as técnicas 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM.

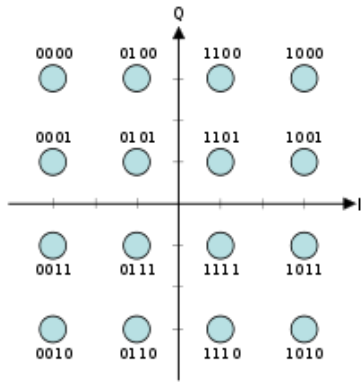


Figura 3-10 Diagrama de Constelação 16-QAM

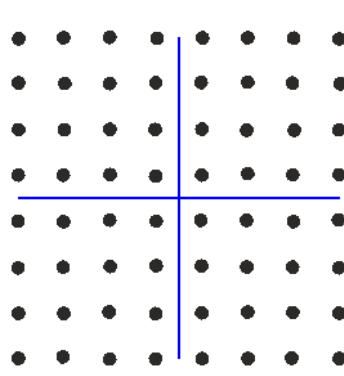


Figura 3-11 Diagrama de Constelação 64-QAM

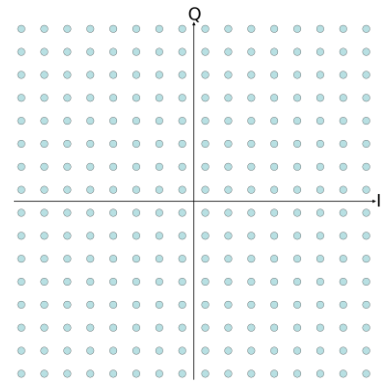


Figura 3-12 Diagrama de Constelação 256-QAM

A modulação QAM tem como cenários de aplicação sistemas que necessitam de alto débito de transferência de informação, como por exemplo comunicações rádio, transferência de sinal televisão digital, conexões por cabo a modems, entre outras.

A principal vantagem desta técnica de modulação digital é a quantidade de bits por símbolo, que imprerivelmente permite um aumento do débito de transferência com uma pequena alocação de largura de banda.

Por outro lado, esta técnica apresenta uma grande desvantagem a nível de modulação e desmodulação, já que pode chegar a níveis de complexidade não acompanháveis por qualquer sistema, pelo que o custo de produção de emissores e recetores QAM é bastante alto. É ainda importante referir que quanto maior a quantidade de símbolos definidos no diagrama de constelação IQ, à qual está também associado o aumento da quantidade de informação transmitida, aumenta também a suscetibilidade à introdução de erros, já que a proximidade entre os vários símbolos é também aumentada. Desta forma, a presença de um pequeno ruído ou interferência pode levar a uma má interpretação do símbolo, podendo este ser confundido com um outro, ou ainda descartado por estar fora dos valores padrão da modulação.

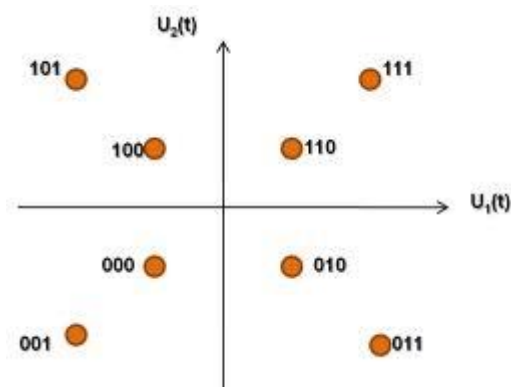


Figura 3-13 Diagrama de Constelação 8-QAM Cross

Por fim, um sinal modulado pela técnica 8-QAM, caracterizado por definir 3 bits por símbolo, é apresentado na figura abaixo. A codificação dos bits está patente na Figura 3-13 acima. São destacadas para este tipo de modulação 2 valores de amplitude e 4 valores de fase, que combinados garantem 8 símbolos distintos para armazenar informação. Na Figura 3-14 é demonstrado o exemplo de um resultado da modulação segundo o diagrama de constelação visto anteriormente.

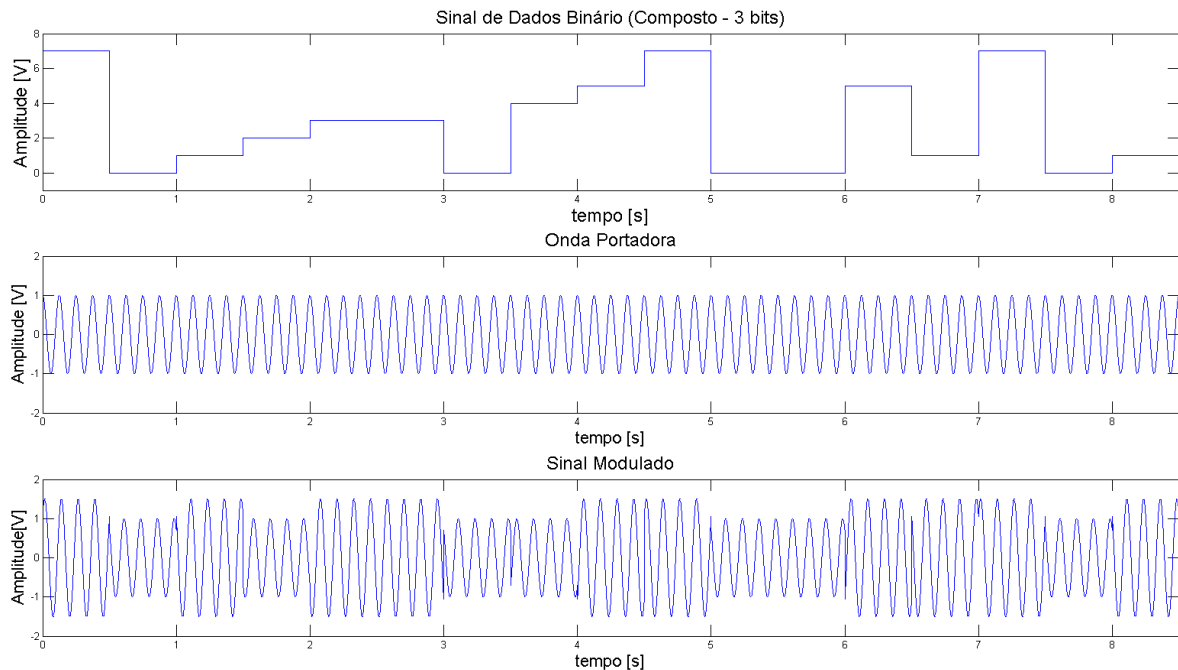


Figura 3-14 Modulação 8-QAM

3.2 Propriedades de Combinações de Sinais Sinusoidais

O objetivo desta dissertação passa, como anteriormente referido, pela criação de um dispositivo capaz de receber o sinal de correção GNSS, proveniente de um satélite e modulado em BPSK. Neste subcapítulo serão apresentadas algumas propriedades da multiplicação de sinais sinusoidais, que permitem a criação de um desmodulador de sinais BPSK simples e eficaz.

Inicialmente será apresentada a forma de modulação de um sinal em BPSK e são explicadas as suas características. Posteriormente são apresentadas algumas das propriedades dos sinais sinusoidais e também dos sinais resultantes da combinação destes com outros sinais semelhantes.

3.2.1 Modulação BPSK

Na modulação BPSK, utilizam-se para definir os bits 2 símbolos, que mais não são do que duas ondas desfasadas em 180° . Uma forma simples de inverter a fase de uma onda em 180° , é a multiplicação desta pelo valor -1. Esta propriedade é explicada nas equações 1, 2 e 3.

$$-1 * \text{sen}(\theta) = \text{sen}(-\theta) \quad (1)$$

$$\text{sen}(\theta + \pi) = \text{sen}(-\theta) \quad (2)$$

$$-1 * \text{sen}(\theta) = \text{sen}(\theta + \pi) \quad (3)$$

Desta forma, resta transformar o sinal de dados com domínio entre 0 e 1, num sinal que varie entre os valores -1 e 1, para modular o sinal em BPSK. Isto pode ser feito usando a equação 4, onde $p(t)$ é a representação polar do sinal de dados $d(t)$. A duração de cada bit é inversamente proporcional ao débito pretendido, ou, noutro termo à frequência do sinal de dados.

$$p(t) = 2 * d(t) - 1 \quad (4)$$

As Figura 3-15 e Figura 3-16 representam o sinal de dados na forma binária e forma polar respetivamente. No sinal polar os bits a 0 são representados por uma amplitude de -1V.

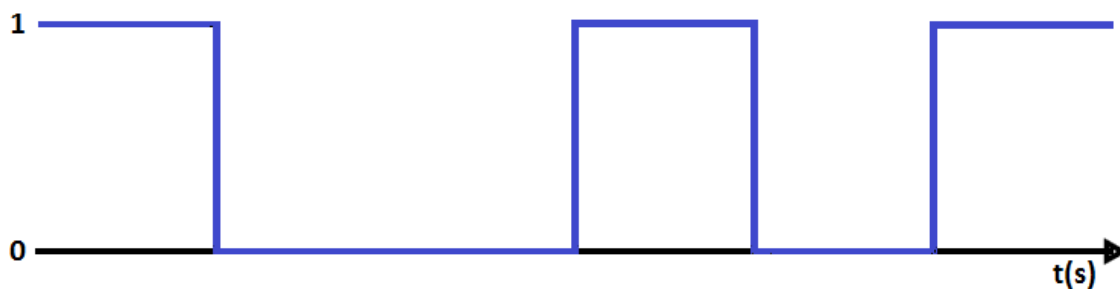


Figura 3-15 Sinal Digital Binário

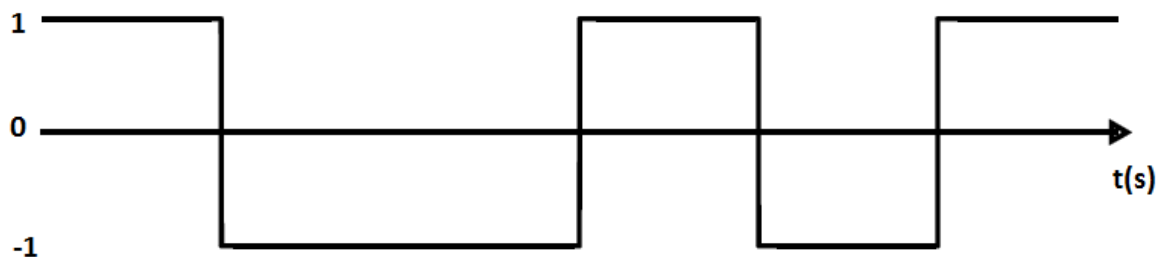


Figura 3-16 Sinal Digital Polar

Seguidamente à determinação do sinal polar de dados, este deve ser multiplicado por uma onda sinusoidal, que servirá de portadora, este processo não é mais que a modulação do sinal de dados e é representado na Figura 3-17 abaixo. A onda portadora pode ser definida como $\text{sen}(2\pi f_c t)$, onde f_c é a frequência da portadora e t é o tempo decorrido.

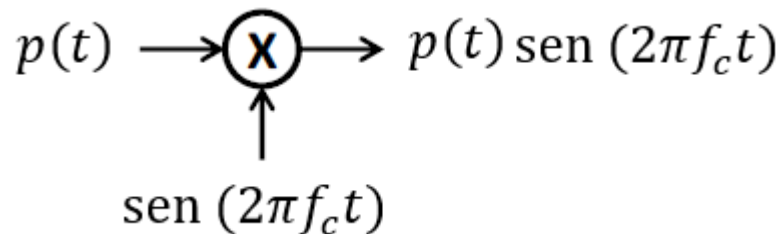


Figura 3-17 Sistema de Modulação BPSK

Finalmente, o sinal modulado é descrito pela equação 5 e apresenta o aspeto da Figura 3-18.

$$S_{BPSK} = p(t) * \text{sen}(2\pi f_c t) \quad (5)$$

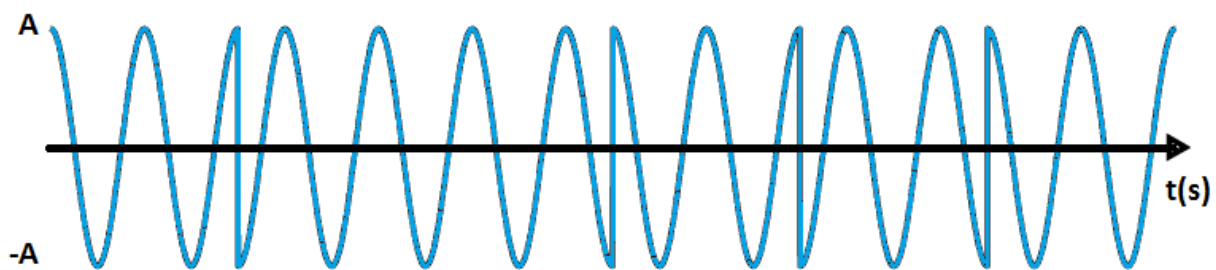


Figura 3-18 Sinal Modulado em BPSK

3.2.2 Multiplicação de Sinusoides com Diferentes Fases

Num contexto de desmodulação, a multiplicação dos sinais modulados por uma réplica da onda portadora tem um papel muito importante já que ajuda a recuperar o sinal de dados modulado sobre a portadora.

A representação do seno e do cosseno na fórmula de Euler é um passo crucial na perceção destas propriedades e estão representadas nas equações 6 e 7.

$$\text{sen}(wt) = \frac{e^{jwt} - e^{-jwt}}{2j} \quad (6)$$

$$\cos(wt) = \frac{e^{jwt} + e^{-jwt}}{2} \quad (7)$$

Atendendo a que apenas a fase do sinal muda numa modulação BPSK, o sinal modulado será multiplicado com uma onda da mesma frequência, apenas desfasada. Desta forma, de seguida serão apresentados alguns exemplos do que acontece na multiplicação de dois sinais sinusoidais[27].

No primeiro caso, dá-se a multiplicação de duas ondas sinusoidais, totalmente em fase e o resultado desta multiplicação pode ser observado na equação 8.

$$\begin{aligned}\text{sen}^2(wt) &= \frac{e^{jwt} - e^{-jwt}}{2j} * \frac{e^{jwt} - e^{-jwt}}{2j} \\ &= \frac{e^{2jwt} - e^0 + e^{-2jwt}}{-4} \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2wt)\end{aligned}\quad (8)$$

Através da análise da equação 8 é possível verificar que quando o sinal modulado está em fase com a réplica da portadora é gerado um *offset* DC (Direct Current), que identifica um bit a 1. O *offset* presente nestas situações está apenas relacionado com a amplitude da onda.

Será agora explicado o que acontece na multiplicação das duas ondas, quando o desfasamento entre elas é superior a 0°. O procedimento está apresentado na equação 9.

$$\begin{aligned}\text{sen}(wt) * \text{sen}(wt + \theta) &= \frac{e^{jwt} - e^{-jwt}}{2j} * \frac{e^{j(wt+\theta)} - e^{-j(wt+\theta)}}{2j} \\ &= \frac{e^{j(2wt+\theta)} - e^{j(wt-wt+\theta)} - e^{j(wt+\theta-wt)} + e^{-j(2wt+\theta)}}{-4} \\ &= \frac{\cos(2wt + \theta)}{-2} - \frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{-4} \\ &= \frac{\cos(2wt + \theta)}{-2} + \frac{\cos(\theta)}{2} \\ &= \frac{\cos(\theta)}{2} - \frac{\cos(2wt + \theta)}{-2}\end{aligned}\quad (9)$$

É então verificável que quando as ondas em causa estão desfasadas o valor de *offset* resultante da multiplicação é correspondente ao valor da fase e dá-se pelo primeiro fator da equação 9, ou seja, $DC_{offset} = \cos(\theta) / 2$. No caso da modulação BPSK e após uma boa sintonização entre emissor e recetor, o desfasamento será de 180°. É conhecido que o cosseno de 180° é igual a -1, pelo que, quando estamos perante um bit a 0, o *offset* DC resultante da multiplicação das duas ondas é igual ao valor negado de metade da amplitude do sinal e há ainda sob esse *offset* a presença de uma onda com o dobro da frequência da recebida e metade da amplitude. Esta característica ajuda na desmodulação de um sinal BPSK, já que a análise de um valor DC como representação do valor do bit é um processo simples e alcançável a uma série de dispositivos de complexidade baixa.

A figura abaixo representa uma simulação sobre as equações descritas acima, demonstrando que a partir de um sinal modulado em BPSK e uma boa réplica da onda portadora é facilmente retirado o sinal de dados armazenado na onda. Na Figura 3-19, o primeiro gráfico é o sinal modulado em BPSK, o segundo gráfico é uma recriação da onda portadora e no último gráfico estão presentes duas ondas, a onda quadrada é o sinal de dados armazenado na onda modulada, e a onda sinusoidal demonstra a variação do *offset* consoante a diferença de fase presente entre as ondas dos dois primeiros gráficos.

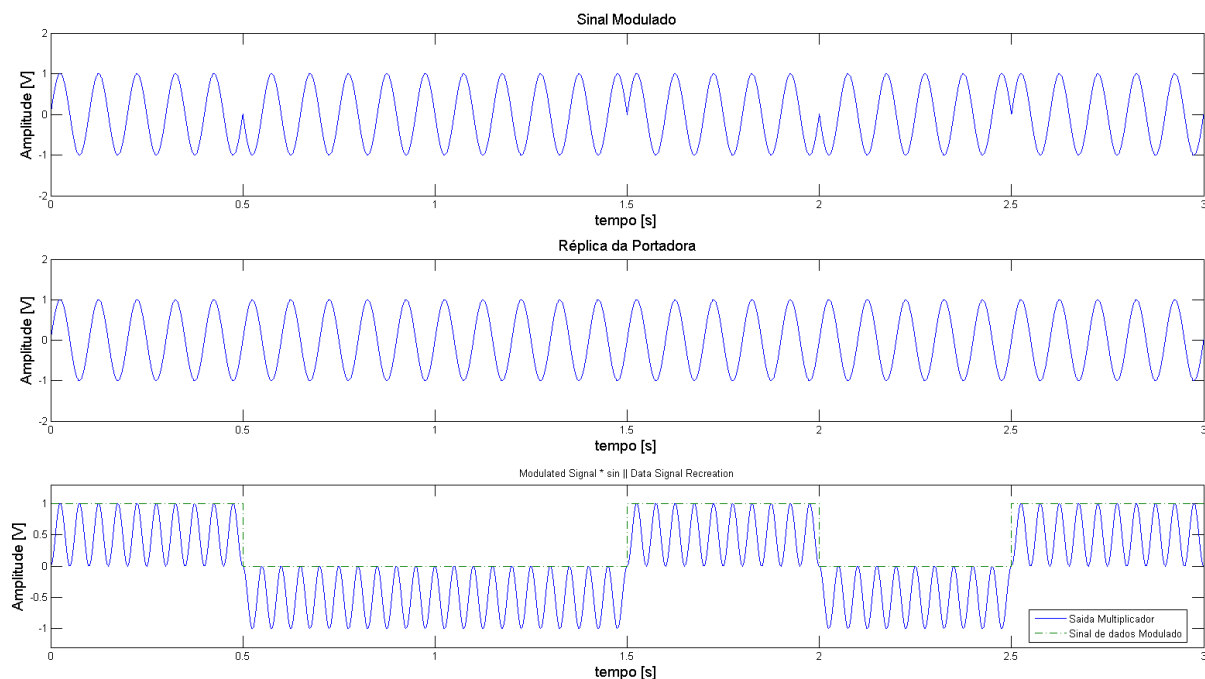


Figura 3-19 Sinal Modulado em BPSK * Onda Portadora

3.3 Desmodulador Costas Loop

Como solução para desmodular um sinal modulado em BPSK fala-se num método bem conhecido e que tira partido das propriedades das funções trigonométricas explicadas nos subcapítulos anteriores, o método Costas Loop[24].

Este método baseia-se na recuperação da onda portadora e na sua multiplicação pelo sinal BPSK modulado e recebido, aproximando assim o seu comportamento ao presente numa PLL.

Na Figura 3-20 é apresentado um diagrama de blocos que explica o funcionamento geral do Costas Loop.

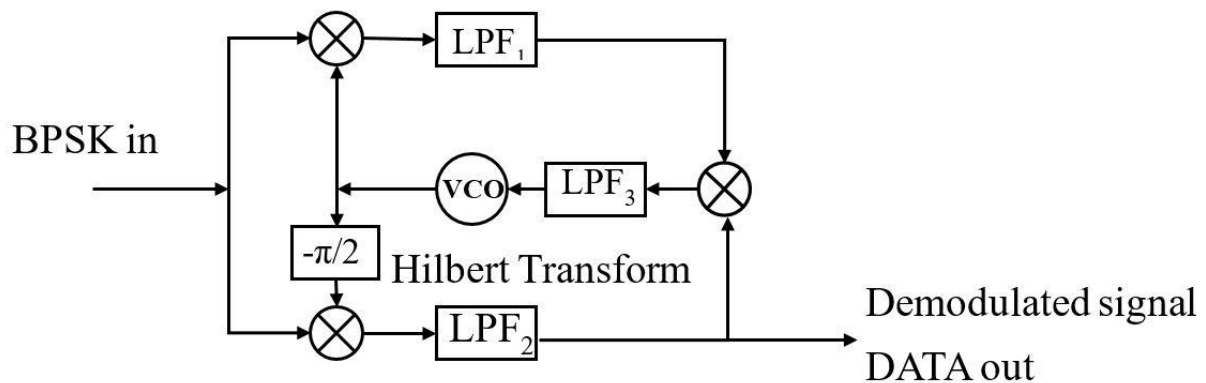


Figura 3-20 Desmodulador Costas Loop – Visão Geral

Este sistema pode ser explicado da seguinte forma:

1. Em primeira instância o sinal BPSK é introduzido no sistema de leitura;
2. Este sinal é multiplicado, em 2 locais distintos por duas ondas com um desfasamento de 90° entre elas, nesta instância são obtidas as componentes I e Q do sinal modulado.
3. As componentes I e Q do sinal são filtradas por um filtro passa-baixo (LPF), já que apresentam o dobro da frequência da onda original, como foi visto na equação 8;
4. Uma destas componentes é suficiente para determinar as mudanças de fase, já que esta varia 180° por cada mudança no valor do bit e assim este valor pode ser encaminhado para a saída do módulo Costas Loop;
5. As componentes I e Q são de novo multiplicadas e filtradas e são dadas como *input* do VCO (*Voltage COntrolled Oscillator*);
6. O VCO gera uma réplica da portadora. A partir do aumento do número de ciclos pelos quais o Loop de Costas passa, é também aumentada a precisão de replicação da onda portadora e este fator permite ainda ter resultados melhores no que toca à desmodulação.

É então importante retirar o conhecimento do funcionamento deste método para a criação de um sistema de desmodulação BPSK eficiente.

3.4 Sintonizador Rádio

Os sinais emitidos pelos satélites, que contêm a informação de correção, são emitidos a frequências muito elevadas. Por esta razão, existe a necessidade de transformar estes sinais modulados em UHF para frequências mais baixas que contenham na mesma a informação modulada. Esta

transformação resulta num sinal a uma frequência intermédia, denominado de sinal IF (*Intermediate Frequency*), que é plausível de ser interpretado por um maior número de dispositivos digitais.

Os sintonizadores rádio, também conhecidos por recetores de conversão direta (DCR)[28], são recetores capazes de desmodular o sinal rádio de entrada no sistema, a partir da utilização de um oscilador local, cuja frequência é idêntica ou pelo menos muito próxima da frequência da onda portadora do sinal modulado. Esta frequência é definida internamente e por ser um conversor direto de apenas uma frequência (ou de uma pequena gama de frequências) torna a sua complexidade num nível não muito alto.

A conversão de um sinal modulado na sua banda base a partir de um DCR é feita num estágio apenas, evitando assim os estágios de transformação a uma ou mais frequências intermédias. Isto é possível porque o oscilador local não se ajusta com *offsets*, mas sim com um valor fixo e bem definido. O resultado obtido é o sinal desmodulado, segundo uma frequência intermédia resultante da dessincronização entre frequências do oscilador local e a frequência da onda portadora recebida.

A seguinte Figura 3-21 demonstra a constituição geral de um recetor de conversão direta.

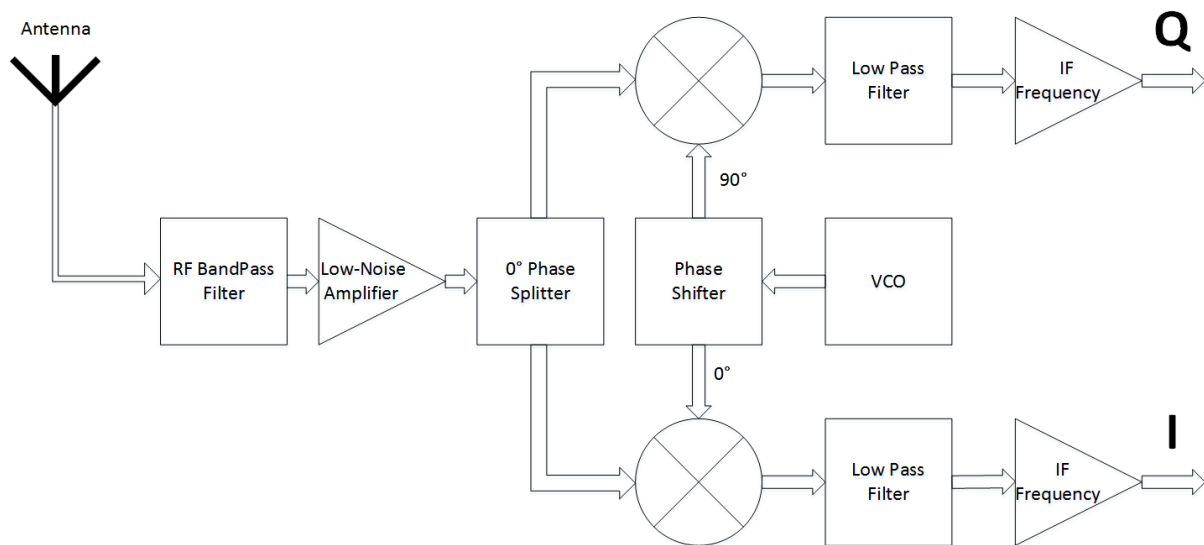


Figura 3-21 Diagrama de Blocos Sistema de Conversão Direta

Após este estudo sobre sintonizadores rádio e considerando a aplicação, é importante considerar a utilização de uma ferramenta deste tipo como primeiro andar de receção do sinal de correção GNSS. Desta forma, configurando o sintonizador rádio à banda L (ou 1575.42MHz), este comporta-se como um desmodulador para o sinal de dados. De referir que este sinal vem somado a um sinal de frequência

residual, que é causada pela diferença entre a frequência gerada pelo VCO (*Voltage Controlled Oscillator*) e a frequência do sinal modulado.

4. GERAÇÃO E AQUISIÇÃO DE SINAL BPSK

Neste capítulo são abordados os vários passos dados de forma a simular uma comunicação BPSK, de forma a atingir os requisitos necessários para receber uma mensagem de satélite modulada da mesma forma.

O primeiro passo foi a geração de um sinal rádio, modulado em BPSK e com uma informação bem conhecida. O segundo passo no sentido da simulação da comunicação foi a receção do sinal gerado num sintonizador rádio e por fim o envio do sinal para uma plataforma de aquisição de sinal, ligada a um PC (*Personal Computer*) para processamento do sinal. Na Figura 4-1 é apresentada uma visão geral sobre este sistema.



Figura 4-1 Visão Geral Sistema de Modulação e Desmodulação BPSK

Seguidamente, os componentes que formam este sistema de teste de modulação e desmodulação de um sinal BPSK serão caracterizados, indicando para cada um, quais as suas características mais importantes e influentes neste processo.

Inicialmente será explicado o SDR, assim como a estrutura da mensagem a enviar e quais as formas de enviar esta mensagem. Na fase imediatamente a seguir é analisado o sintonizador rádio e explicada a sua configuração.

Por fim é analisada a plataforma de aquisição, são apresentadas as suas características e a sua forma de comunicação com a plataforma MATLAB®. É ainda apresentada a análise dos dados recebidos.

4.1 Geração de Sinal BPSK

De forma a gerar um sinal de frequência igual à dos sinais gerados pelos satélites que emitem o sinal de correção GNSS foi utilizado um dispositivo rádio, capaz de modular informação em sinais de alta frequência, gerados internamente.

Este dispositivo é controlado por software e é denominado por SDR (*Software Defined Radio*). O SDR escolhido para este fim foi o dispositivo USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) N210, desenvolvido pela empresa Ettus Research™, apresentado na Figura 4-2 abaixo.



Figura 4-2 USRP N210

Este instrumento pertence à série de *Networked SDRs* e por isso, recebe os dados a modular através de uma comunicação Ethernet com o computador, com débitos até 1Gbps e que permitem uma taxa de amostragem até 50MS/s.

As características principais do dispositivo são:

- ADC (*Analog to Digital Converter*) de 2 canais, 14-bits de resolução, 100MS/s
- DAC (*Digital to Analog Converter*) de 2 canais, 16-bits de resolução, 400MS/s
- DDC (*Digital Down Converter*) / DUC (*Digital Up-Converter*) com 25mHz de resolução
- Suporte para MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)
- Interface de expansão para 2Gbps
- *Frontend* composto por FPGA Spartan 3A-DSP (*Digital Signal Processor*) 3400
- 1MB RAM de alta velocidade
- Pinos I/O controláveis
- Referência de frequência garantida por TCXO (*Thermally Compensated Cristal Oscillator*) 2.5ppm
- Suporte para inclusão de relógio de alta precisão GPSDO (*GPS Disciplined Oscillator*) 0.01ppm

Graças a todas estas características, o SDR N210 é uma ferramenta poderosa de geração de sinais rádio, e o facto de o seu *frontend* ser composto por uma FPGA permite dinamismo e capacidade de atualizações ao longo do tempo, garantindo assim melhorias incrementais na transmissão e modulação de sinais. Na Figura 4-3 apresenta-se a arquitetura do sistema.

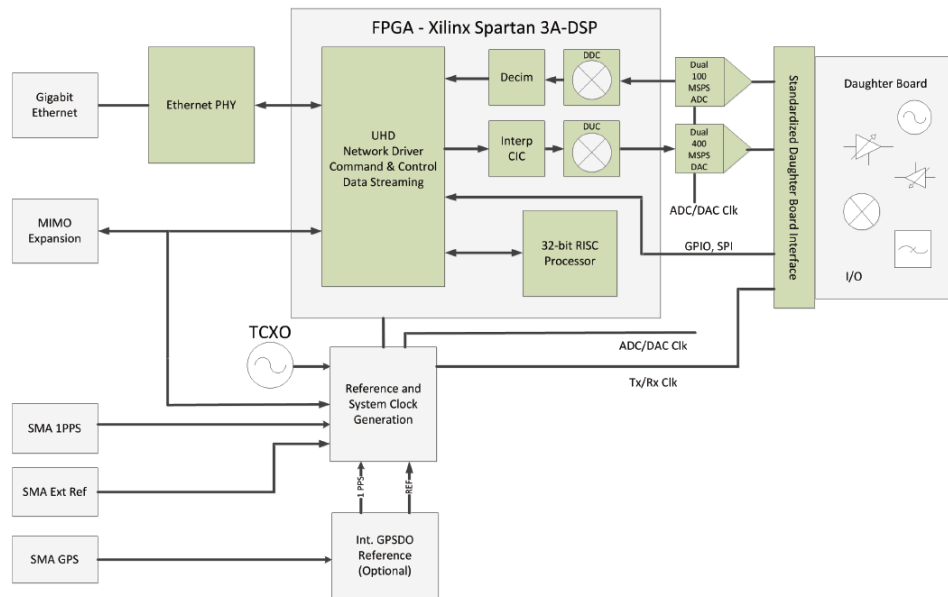


Figura 4-3 Arquitetura do Sistema de Radio USRP N210

Para emissão e receção de radiofrequências este dispositivo necessita de uma *daughterboard*, que opere na gama de frequência desejadas. A *daughterboard* usada foi a UBX40, que permite a geração e aquisição de sinais com frequências entre os 10MHz e os 6GHz, com uma largura de banda de 40MHz. Esta possui ainda RF (*Radio Frequency*) *shielding* para evitar ruídos indesejados, assim como emissão indesejada de radiofrequências para o exterior do aparelho.



Figura 4-4 UBX40

De referir ainda que esta placa permite a operação *full-duplex*, com emissão e receção em simultâneo, ou ainda com receção de dois canais diferentes ao mesmo tempo. As Figura 4-4 e Figura 4-5 apresentam o aspeto exterior e a arquitetura da placa UBX-40, respetivamente.

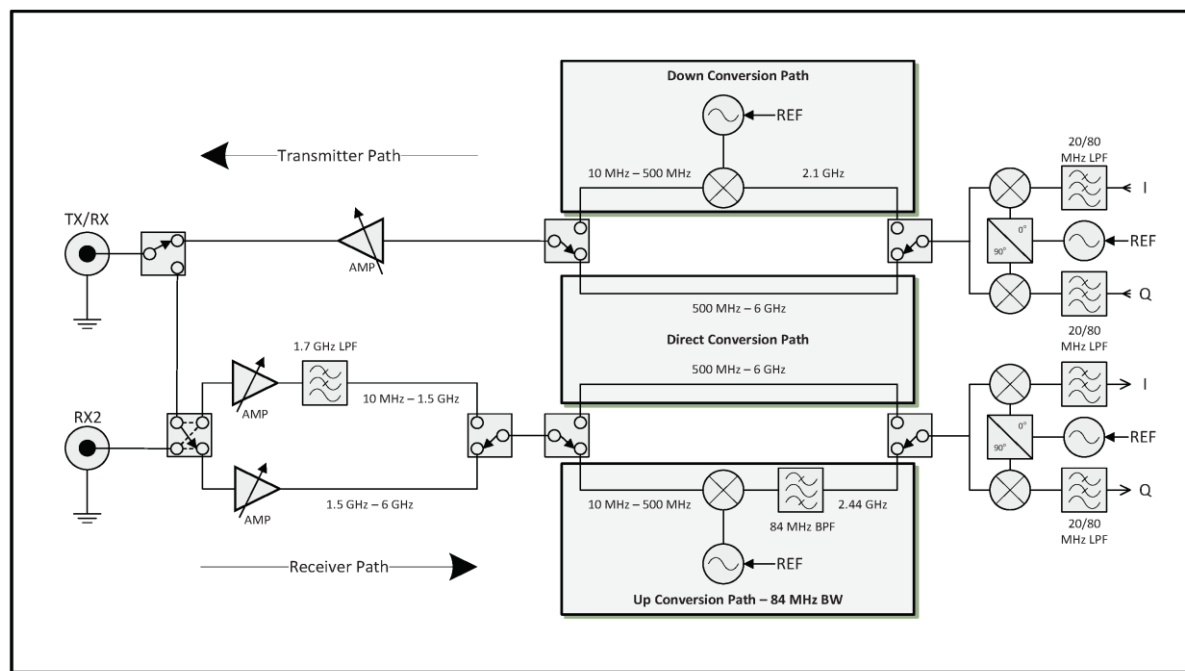


Figura 4-5 Diagrama de Blocos da DaughterBoard UBX40

A modulação de informação da onda é efetuada através da transmissão da mesma através de uma ligação Ethernet. Os dados a modular devem ser enviados na forma complexa, onde a parte real corresponde à componente I do sinal e a parte imaginária corresponde à componente Q do sinal.

De forma a estabelecer uma comunicação com o USRP, é disponibilizada uma série de ferramentas capazes de o fazer, disponíveis para várias plataformas e sistemas operativos, que visam a maximização da produtividade e a minimização do esforço por parte do utilizador.

A primeira ferramenta de suporte é a plataforma de desenvolvimento GNU Radio, um *software open source* de livre acesso, que garante funções de processamento de sinal a serem integradas em dispositivos rádio como o USRP. Possui ainda uma série de aplicações gráficas e exemplos criados pela comunidade que tornam o GNU Radio como uma boa ferramenta de aprendizagem em ambientes académicos. O desenvolvimento de aplicações para SDR através da *framework* GNU Radio pode ser feito em C++ ou em Python, e esta ferramenta é nativa do sistema operativo Linux, pelo que nos outros sistemas operativos só existe em formato adaptado e/ou de compatibilidade.

A segunda ferramenta de *Software* disponibilizada para controlo do SDR é o RFNoC™, um extra a aplicar à ferramenta GNU Radio que permite a geração e edição de imagens para carregar na FPGA, sem que haja necessidade de programar em Verilog ou VHDL.

Existem ainda blocos de suporte às *frameworks* MATLAB®/Simulink® e LabView™, que permitem a possibilidade de configurar o SDR para emitir ondas geradas na própria plataforma, assim como a

possibilidade de armazenar automaticamente os dados de recepção (se for o caso) do SDR na plataforma, sem que hajam trocas de informação entre programas/processos.

Por fim, de modo a conseguir usar um qualquer USRP da Ettus Research e em qualquer sistema operativo, a empresa desenvolveu a API (*Application Programming Interface*) UHD (*USRP Hardware Driver*). Esta API, apresenta uma dificuldade de manuseamento superior a todas as ferramentas referidas anteriormente, contudo, permite um controlo total sobre o dispositivo, e permite gerir todo o processo de transmissão de dados de forma eficiente.

As ferramentas utilizadas para manuseamento do SDR foram o Simulink e a API UHD.

4.1.1 Estrutura da Informação Modulada

No âmbito da transmissão de dados entre emissor e recetor, foi criado um formato de mensagem conhecido por ambas as entidades envolvidas na comunicação, de forma a comprovar o perfeito funcionamento, quer do sistema de modulação e geração do sinal, quer do recetor e da sua capacidade em desmodular a informação do sinal recebido.

Nesta fase do trabalho, o objetivo dominante é a construção de um sistema capaz de desmodular informação num sinal modulado em BPSK, independentemente do tipo de informação. Desta forma, o formato da mensagem e o protocolo escolhidos são de baixa complexidade, e permitem assim um maior foco na capacidade de transcrever mudanças de fase do sinal, em informação útil.

O formato de mensagem criado é caracterizado pela Figura 4-6 abaixo:

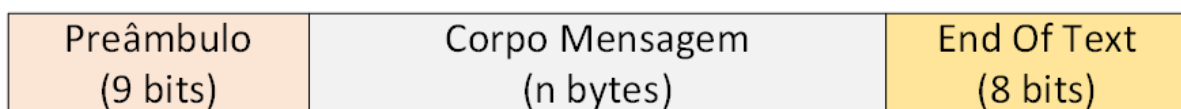


Figura 4-6 Estrutura da Mensagem

As componentes que constroem esta mensagem são:

- **Preâmbulo:** esta componente surge como a primeira parte da mensagem e a sua função é a sincronização entre emissor e recetor da mensagem. Sendo que o corpo da mensagem vem apenas com caracteres alfanuméricos codificados em ASCII127, foi criada uma sequência de 9 bits irreplicável no corpo da mensagem para definir o preâmbulo. No lado do recetor, após a recepção deste preâmbulo, é sabido que toda a informação que se segue é informação útil.
- **Corpo da Mensagem:** nesta componente é inserida toda a informação a transferir entre emissor e recetor do sinal, o seu tamanho é ilimitado e a informação, neste protocolo específico de comunicação, vem codificada em ASCII, ou seja, cada unidade de

informação vem armazenada num único byte (8 bits). É expectável que a informação decodificada na receção do sinal, seja igual àquela que é codificada no emissor.

- **End Of Text:** aquando da receção do sinal, e sendo que o tamanho do Corpo da Mensagem é ilimitado, existe a necessidade de determinar quando termina a trama de informação. Para isto, foi inserido um mecanismo simples de término de comunicação através da introdução deste campo, ou seja, um aviso que o emissor coloca no sinal de dados, para o recetor cessar a receção de informação, pelo menos até ao próximo preâmbulo, que avisa a presença de uma nova trama de informação. O sinal utilizado para representar o final de trama, foi o símbolo EOT (*End of Text*) que é por si um símbolo bem definido na tabela ASCII, pelo que é também composto por 8 bits.

4.1.2 Transmissão da Mensagem MATLAB

De forma a transmitir a mensagem em sinal rádio a partir do USRP foi utilizado suporte de *hardware* para MATLAB/Simulink de nome *Communications System Toolbox Support Package for USRP Radio*. Esta biblioteca é composta pelos blocos SDRu Receiver e SDRu Transmitter, que podem ser observados na Figura 4-7.

Communications System Toolbox Support Package for USRP(R) Radio

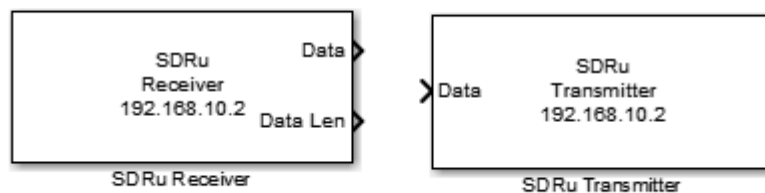


Figura 4-7 Suporte em Simulink para utilização do USRP

No caso de emissão, o único bloco utilizado foi o SDRu Transmitter e a este são associados vários parâmetros configuráveis pelo utilizador para atingir o formato de comunicação pretendido. Os parâmetros a definir, e a sua definição e/ou valores atribuídos são:

1. USRP IP Address (endereço de IP ao qual são enviados os dados a modular): 192.168.10.2.
2. Center Frequency (frequência da onda rádio gerada onde vão ser modulados os dados): 1500MHz.
3. LO Offset (*offset* a introduzir no oscilador local): 0Hz.
4. Gain (Ganho na banda base): 10dB.
5. Interpolation Factor (fator de interpolação): 128.

Dentro destes parâmetros é importante referir a importância do fator de interpolação, já que este influencia todo o processo de emissão de sinal, assim como tem implicações diretas na comunicação

entre o *host* e o USRP. Sumariamente, o rádio N210 tem um DSP de 100MHz, pelo que, em operação normal atualiza os dados de *input/output* a esta frequência e apresenta uma resolução temporal de 10ns. Esta frequência é demasiado alta e necessita de um débito de transmissão de dados altíssima entre o PC e o USRP. De forma a reduzir esta necessidade de alto débito de transferência de dados, é introduzido o fator de interpolação que não é mais que um divisor à frequência do DSP.

Sendo que o bitrate do sinal a modular é de 1500bps, a duração de cada bit é de aproximadamente 667µs, pelo que a resolução de 10ns é desnecessária. Utilizando um fator de interpolação de 128 garante uma resolução de atualização de dados de 1.28µs (associado um erro de 0.192% por bit). Este valor exige um valor de transferência de dados relativamente baixo e facilita a reprodução do sinal.

Foi então criado um modelo simples em Simulink (Figura 4-8), cujo intuito é a emissão do sinal modulado em BPSK.

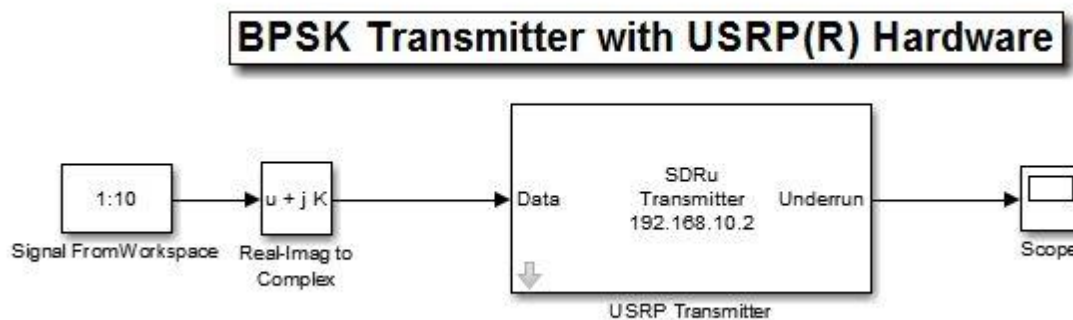


Figura 4-8 Modelo Simulink de Emissão de Sinal

O sinal inicial é criado através de uma script MATLAB, que começa por agregar a informação numa só mensagem, ou seja, preâmbulo, corpo de mensagem e EOT. Todos estes são em primeira fase convertidos num vetor binário (1,0), que é depois transformado em polar (1,-1). Posto isto, é gerado o vetor final de dados, onde cada bit é replicado n vezes, onde n é definido pela equação 1.

$$n = \frac{f_{DSP}}{\text{bitrate} * \text{interpolation_factor}} \quad (1)$$

Após a geração do vetor de informação com as coordenadas polares a enviar ao USRP, este vetor é ainda convertido a valores imaginários (complex float 32 bits), formato este que representa a amostra IQ.

4.1.3 Transmissão da Mensagem a partir da API UHD

Ainda que inicialmente a *Communications System Toolbox Support Package for USRP Radio* seja uma boa ferramenta, principalmente graças à sua simplicidade, esta acarreta também uma série de limitações. A primeira das limitações é a utilização de apenas um canal de cada vez, ou seja, não permite a utilização simultânea do canal RX/TX e do canal RX2, impossibilitando assim o teste em *loopback*. Uma outra limitação, e esta com maior influência no estudo desta dissertação, é a limitação de débito e performance na transferência de dados, já que a transmissão se dá em cima de uma camada extra de *Software*, neste caso o MATLAB que acaba por aumentar o *overhead* do processo, tornando-o assim consideravelmente limitado em termos de velocidade de processamento.

Neste contexto e como resposta aos problemas citados anteriormente, utilizou-se a API UHD [29]. Esta biblioteca permite a sua integração com código C/C++ e garante total controlo das funcionalidades do rádio.

Esta API foi utilizada dentro do sistema operativo Linux e permite uma clara melhoria na performance de transmissão de dados. O uso desta API permitiu reduzir ainda mais o fator de interpolação, de modo a ter ainda uma melhor resolução temporal, no que toca à modulação do sinal. Por outras palavras, estas características diminuem a frequência de ocorrência do erro de *UnderRun*, que advém da necessidade do DSP colocar uma amostra na saída do rádio e não a ter disponível.

No sentido de utilizar esta API foi criado um projeto na *framework* Qt Creator, e foram resolvidas todas as dependências de forma a ter acesso a todas as funções necessárias à transmissão do sinal modulado. Em primeira instância, é construído um vetor binário correspondente à mensagem a modular (o formato de mensagem continuou intacto). Depois desta fase, é calculado o número de *samples* a atribuir a cada bit e este processo, como na transmissão por MATLAB, é calculado pela equação 1, apresentada anteriormente. Neste caso o número de amostras por bit é superior ao método de comunicação com o USRP visto anteriormente, já que o fator de interpolação é inferior. O valor n é, depois de calculado, utilizado como tamanho de um buffer, que será transmitido ao USRP a cada bit.

Após a determinação da mensagem e tamanho das amostras, passa-se à configuração dos parâmetros do USRP, como frequência da onda portadora, ganho na banda base, largura de banda, fator de interpolação (o mesmo utilizado para calcular n), canal de emissão e origem do relógio de referência (que pode diferenciar entre um oscilador interno, oscilador externo ou ainda relógio do GPSDO).

A seguir à configuração é gerado um objeto `uhd::tx_streamer`, com base numa estrutura de argumentos do tipo `uhd::stream_args_t`, que é construída para definir os tipos de dados a transmitir e a forma como são transmitidos, por exemplo, a determinação que as amostras a transferir vão em formato “complex<float32>” e que a ordem de transmissão é 16bits Q + 16bits I. O objeto `uhd::tx_streamer` é a interface utilizada para transmissão de amostras e representa a camada entre as amostras no *host* e as amostras dentro do processo de transmissão do DSP. A Figura 4-9 representa o *streamer* entre *host* e o USRP.

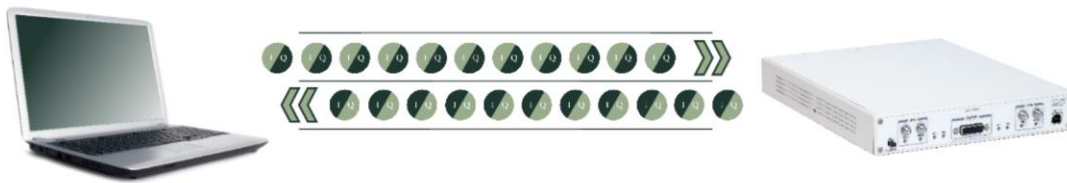


Figura 4-9 Representação Tx_Streamer

É ainda necessário criar um objeto denominado por *metadata* responsável pelo controlo de fluxo da transmissão, e este objeto será utilizado na função de envio de dados pelo *streamer*. Neste objeto são definidas *flags* que permitem regular o processo de envio, como por exemplo, a *flag* que indica o fim de uma trama.

Por fim, é chamada a função de envio, pertencente ao objeto `uhd::tx_streamer`, que recebe como argumentos o apontador para o início do *buffer* a enviar, o tamanho do *buffer* e o objeto *metadata_t*.

4.2 Sintonização do Sinal recorrendo ao L-Band Tuner Max2121

Nesta fase do processo de modulação e desmodulação do sinal BPSK, o sinal é, a menos de um atenuador de 30dB, diretamente enviado do USRP para o sintonizador de L-Band Max2121[30].

Este sintonizador é uma solução de baixo custo para conversão direta de sinais, desenhado especialmente para aplicações relacionadas com comunicações que envolvam satélites. Este transforma diretamente os sinais recebidos para a sua banda base a partir do seu conversor de banda larga, e opera com frequências entre os 925MHz e os 2175MHz. A saída do dispositivo é dada nas componentes I e Q do sinal, e em todo o processo é possível controlar cerca de 80dB de ganho.

Este sintonizador contém na sua arquitetura, entre outros de menor relevância, os seguintes componentes:

- VCOs totalmente monolíticos;
- Sintetizador fracionário de frequências;
- Amplificadores de baixo ruído;
- Interface de comunicação para configuração I2C (*Inter-Integrated Circuit*).

Uma visão geral sobre este circuito é apresentada na Figura 4-10:

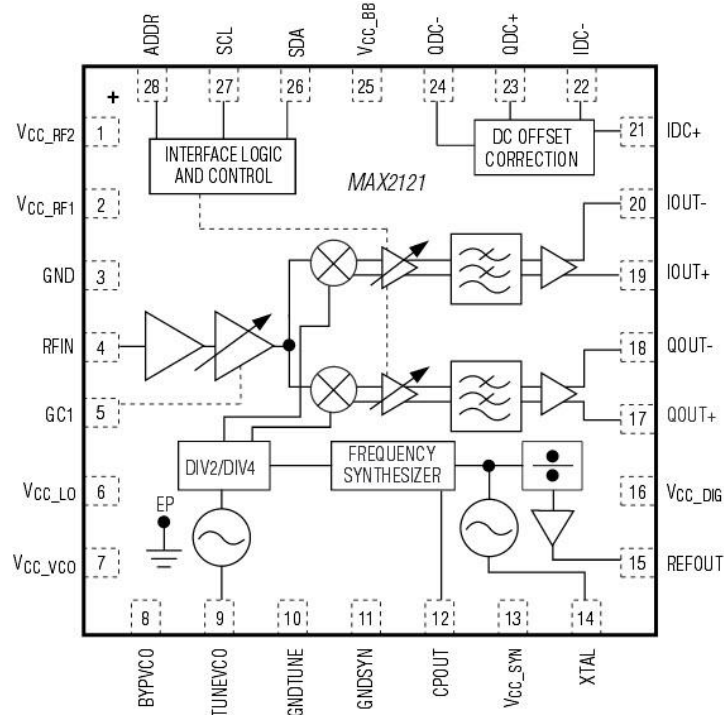


Figura 4-10 Diagrama de Blocos Max2121

Neste teste, o sintonizador MAX2121 foi testado numa plataforma de avaliação – MAX2121 EV Kit[31], pronta a utilizar e configurável por USB (*Universal Serial Bus*), através da placa de comunicações generalista INTF3000 USB, também da empresa MAXIM Integrated®. Esta placa de avaliação apresenta-se como na Figura 4-11.



Figura 4-11 Max2121 EV Kit

De forma a utilizar corretamente esta placa, conecta-se com a placa de interface, que por sua vez está ligada ao computador. É importante referir que a alimentação da placa que contém o MAX2121 é independente da utilizada pela INTF3000. Seguidamente liga-se o ponto V_{GC} a uma outra fonte regulável, e é este valor que controla o ganho dos amplificadores à saída dos andares I e Q do sinal. Em seguida é ligada a saída do rádio à entrada RFIN do MAX2121.

Depois das ligações estarem concluídas, é ainda necessário configurar o sintonizador para a frequência desejada, nomeadamente para os 1500MHz. O facto de ser utilizado o EV Kit evita a necessidade de configurar todos os registos do MAX2121 através de I2C, já que existe uma aplicação para *Desktop* e com um ambiente gráfico amigável para a configuração do circuito. Na Figura 4-12 é demonstrado o aspeto da aplicação. Como pode ser observado, existe um campo editável onde se coloca a frequência pretendida, e todo o resto das configurações para sintonizar é calculado automaticamente, segundo alguns parâmetros.

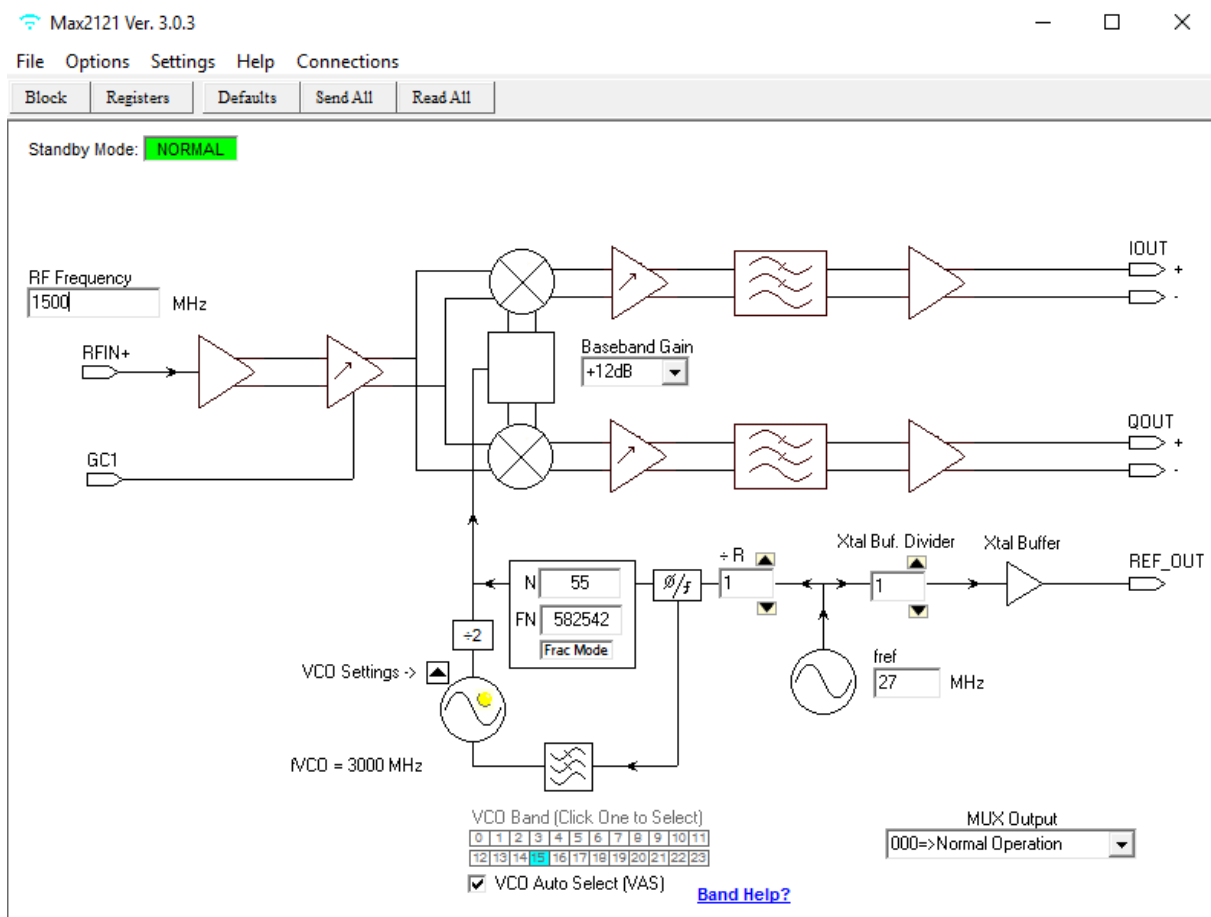


Figura 4-12 Aplicação de Configuração do Max2121

Por fim, o sinal é encaminhado para uma saída diferencial, com 2 canais, I e Q para posterior leitura.

4.3 Aquisição do Sinal

De forma a fazer uma leitura dos sinais diferenciais de saída do Max2121, foi utilizada uma ferramenta de aquisição de sinais da National Instruments®, de modelo NI DAQ-USB 6363 apresentada na Figura 4-13.



Figura 4-13 NI DAQ-USB 6363

Esta plataforma de aquisição de sinal é caracterizada por 32 entradas analógicas, é capaz de fazer aquisição a 2MS/s com resolução de 16bits e com uma gama de valores entre $\pm 10V$. Foram utilizados 4 canais de leitura (I+, I-, Q+ e Q-), a 250KS/s em cada canal, de forma a determinar os sinais I e Q.

Por fim esta plataforma tem ainda suporte em MATLAB através da ferramenta *Data Acquisition Toolbox*, o que permite o armazenamento de dados no mesmo ambiente em que estes são processados.

4.4 Descodificação de Dados

Como foi anteriormente explicado, os dados vêm modulados em BPSK numa portadora de 1500MHz, que passa pelo sintonizador Max2121 que por sua vez faz a desmodulação do sinal. Acontece que, devido à diferença de frequências entre a portadora do sinal e a frequência gerada internamente, no Max2121, o sinal de interesse aparece sobreposto com a diferença entre a frequência da portadora, e a frequência de desmodulação. Assim sendo surge a necessidade de analisar este *output* diferencial do sintonizador para retirar a informação modulada em BPSK, agora sobreposta com a diferença de frequências já explicada.

A ferramenta utilizada para este fim foi o *Software* de cálculo numérico MATLAB, capaz de integrar no mesmo ambiente e de forma interativa valências como análise numérica, processamento de sinais, construção de gráficos, etc.

Como referido, existe uma ferramenta dedicada totalmente ao controlo de placas de aquisição, como a NI DAQ-USB utilizada, e por esta razão permite a configuração destas (em termos de quais os canais a utilizar, frequência de amostragem, entre outros), assim como a retenção automática dos dados adquiridos pela placa no ambiente de processamento.

O primeiro passo de todo o processo foi então a configuração de uma sessão de aquisição de dados, declarando assim 4 canais de aquisição absoluta, a 250MS/s por cada e em seguida é feita a determinação dos valores do I e Q através de um cálculo diferencial explicado nas equações 2 e 3, onde n representa o número da amostra em questão. Posteriormente na Figura 4-14 é apresentado um gráfico onde são apresentados exemplos das amostras IQ adquiridas.

$$I[n] = I_+[n] - I_-[n] \quad (2)$$

$$Q[n] = Q_+[n] - Q_-[n] \quad (3)$$

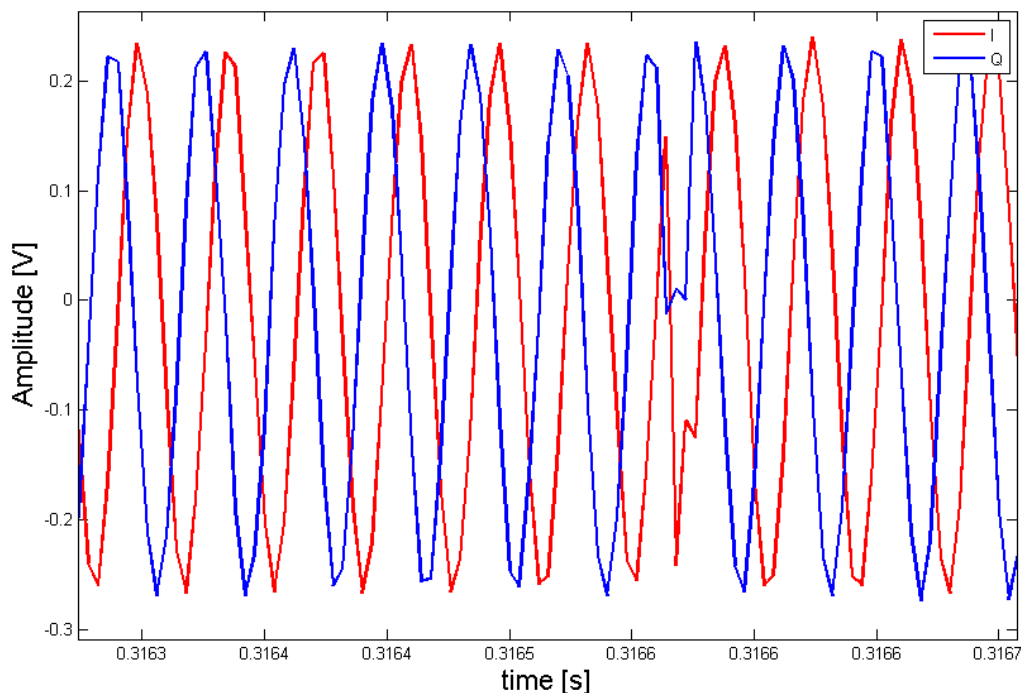


Figura 4-14 Amostras IQ

Partindo das amostras I e Q do sinal modulado, resta agora traduzir este sinal em informação digital, ou seja, bits que compõe a mensagem enviada. É conhecido que em BPSK o sinal não vem

diretamente codificado com valores analógicos correspondentes a valores digitais, pelo que, a sua informação é codificada em transições de fase [32]. Baseado nesta informação foi criado um algoritmo próprio, cujo objetivo principal é a detecção de mudanças de fase (anormais) do sinal.

Neste algoritmo, o primeiro passo é o cálculo do valor instantâneo da fase do sinal θ_s , através da utilização da equação 4.

$$\theta_s(n) = \text{atan} \left[\frac{Q(n)}{I(n)} \right] \quad (4)$$

Nesta fase já estão disponíveis os vetores com as componentes I e Q do sinal, assim como o valor de fase instantânea para cada ponto. É suposto que para um sinal desmodulado cuja frequência da portadora seja diferente do sinal a desmodular, a fase siga a tendência da curva presente na Figura 4-15.

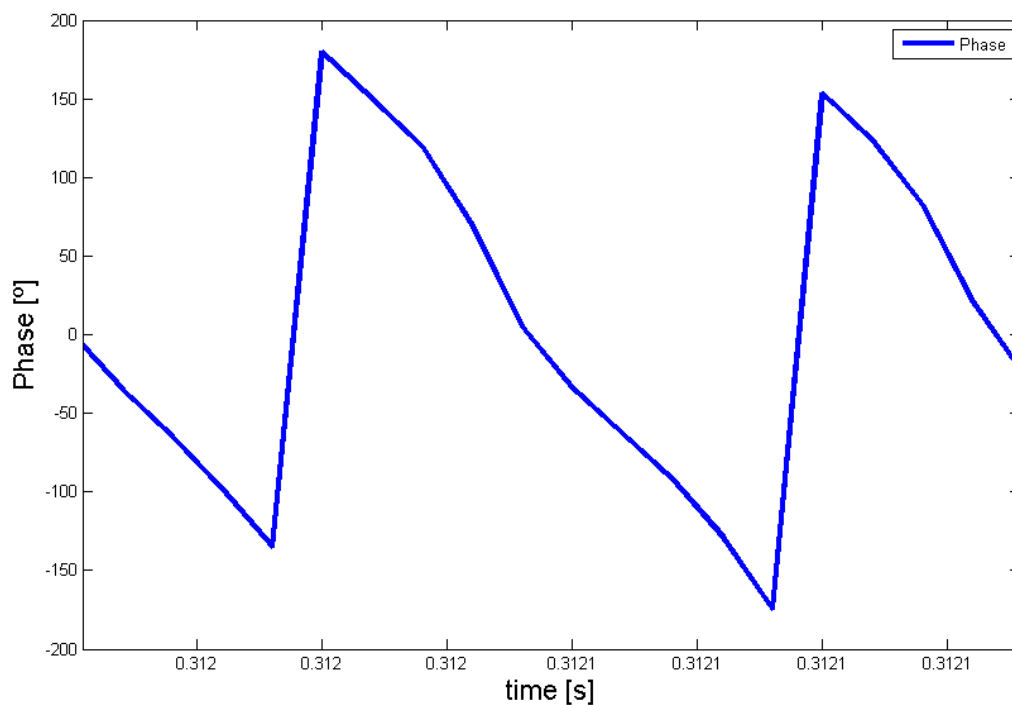


Figura 4-15 Curva de Fase de um Sinal Desmodulado cuja Frequência da Portadora é Diferente da do Sinal Modulado

É então verificável que segundo a equação utilizada (4), a fase do sinal desce dos 180° até aos -180° com um pequeno declive e quando atinge o mínimo, volta aos 180° com um declive muito elevado. Partindo desta informação, de forma a determinar mudanças de fase no sinal é necessário procurar situações que sejam anormais ou que não estejam no padrão declarado.

Para encontrar facilmente estas situações de anormalidade, foi criado um novo vetor onde os seus valores são calculados mediante o valor de mudança de fase entre cada dois pontos distintos da curva de fase do sinal. O cálculo dos valores de diferença instantânea de fase $\Delta\theta_s$ deste vetor está traduzido na equação 5.

$$\Delta\theta_s(n) = \theta_s(n+1) - \theta_s(n) \quad (5)$$

Pela análise do padrão é verificável que os valores de fase, em situação normal estão nos intervalos $[-50^\circ; 0^\circ]$ e nos $[280^\circ; 360^\circ]$. O primeiro intervalo é relativo ao declive negativo da onda e o segundo intervalo está relacionado com as mudanças entre os valores mínimo e máximo de fase. A Figura 4-16 abaixo demonstra os valores de fase instantânea (a azul) e os valores de variação de fase instantânea (a vermelho), e demonstra o comportamento explicado da variação de fase em situações normais.

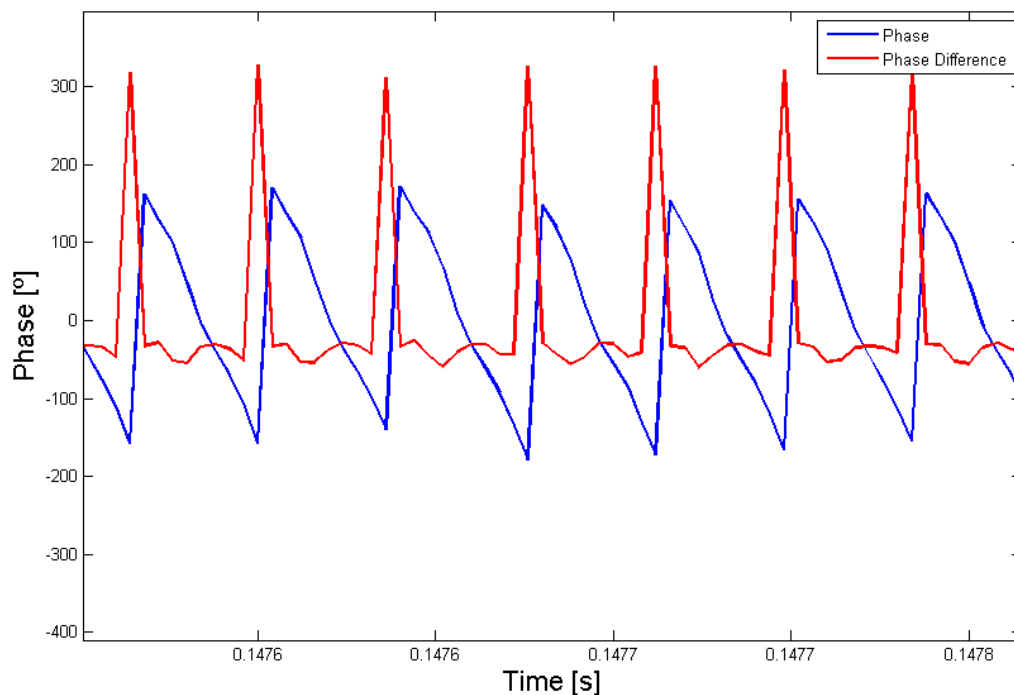


Figura 4-16 Fase e Diferença de Fase Instantâneas

Seguidamente, é necessário procurar no sinal todas as mudanças de fase, que essencialmente são os casos que se desviam do padrão determinado anteriormente, ou seja, está-se perante uma mudança de fase quando: $\Delta\theta_s(n) \notin [-50^\circ, 0^\circ] \cup [280^\circ, 360^\circ]$; ou ainda representado de outra forma quando: $\Delta\theta_s(n) \in [-360^\circ, -50^\circ[\cup]0^\circ, 280^\circ[$. Na Figura 4-17 é apresentada uma situação de mudança de fase, onde mais uma vez são demonstrados os valores de fase instantânea (a azul) e os valores de variação de fase instantânea (a vermelho), e adicionalmente é introduzido um vetor (a verde) de valores discretos que apresentam um valor a alto quando há mudança de fase nesse instante, e um valor a baixo quando não há presença de mudança de fase.

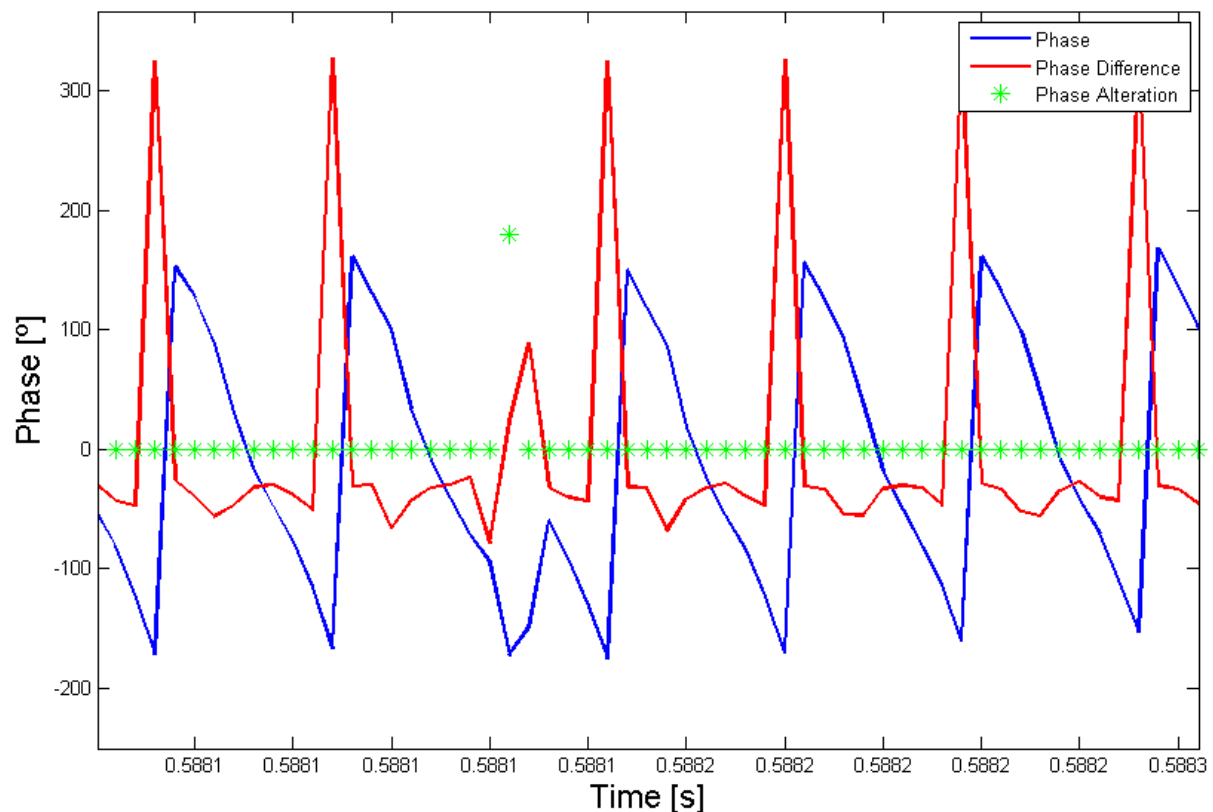


Figura 4-17 Mudança de Fase Detetada

Sabendo todas as ocorrências de mudança de fase, rapidamente se reconstrói o sinal binário utilizado para modular a onda em BPSK. É ainda importante referir que o valor do primeiro bit é dado arbitrariamente e só poderá ser confirmado e/ou resolvido após encontrar o preâmbulo da mensagem, já que até lá é impossível saber se a transição de fase ocorre de um bit a 0 para 1, ou se acontece o oposto.

A Figura 4-18 demonstra o vetor de dados binários reconstruído (gráfico de cor azul), destacando neste os pontos onde ocorrem transições de fase (pontos a vermelho). O valor escolhido para o primeiro bit foi 1 e os restantes valores do sinal estão dependentes desta escolha inicial. O passo a seguir é a procura de uma sequência igual ao preâmbulo, e em simultâneo a procura de uma sequência igual ao valor complementar do preâmbulo, se a primeira procura tiver resultado, implica que o valor do primeiro bit está correto, se ao invés se der com sucesso a segunda procura, é necessário inverter todos os valores dos bits.

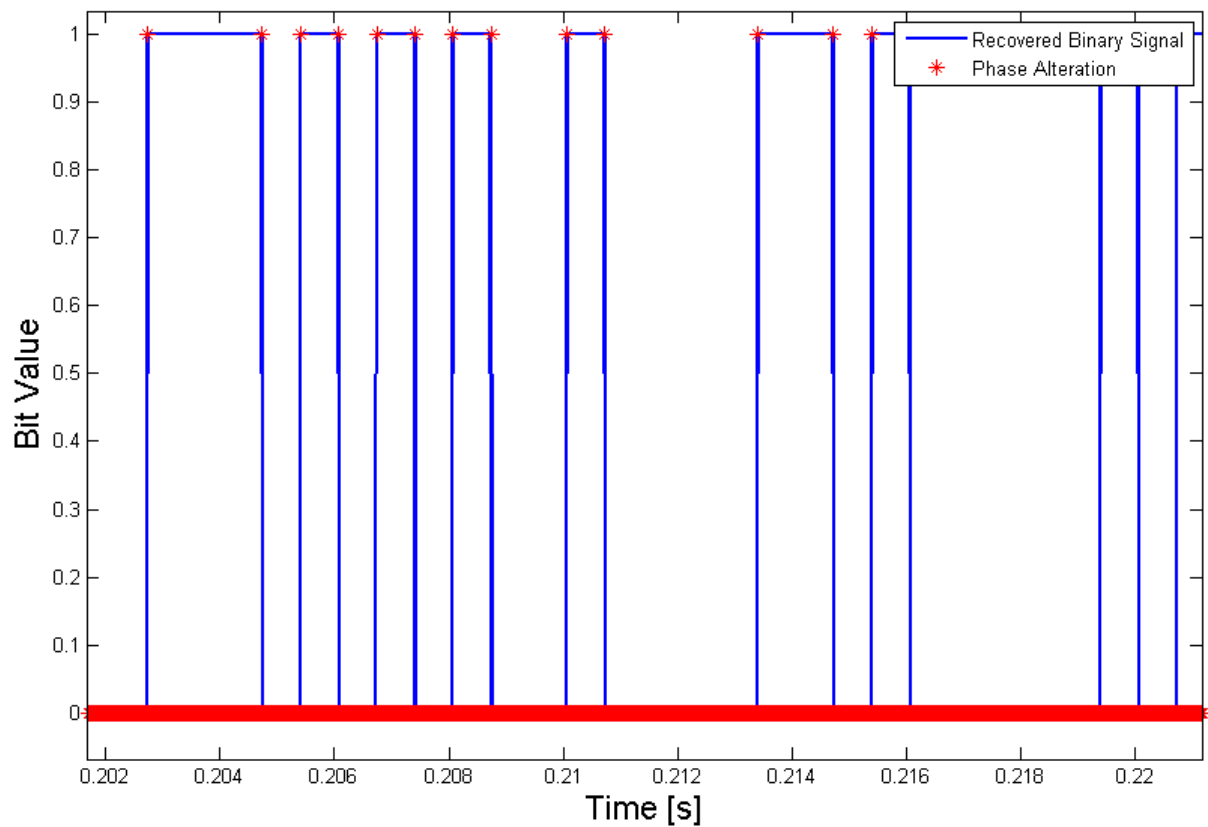


Figura 4-18 Sinal Binário Reconstruído

Por fim, depois de encontrado o preâmbulo (ou preâmbulo negado) são armazenados todos os bits, empacotados de 8 a 8 (ou num byte) até encontrar o EOT. Quando encontrada esta parte da mensagem, significa que é o fim da mesma e que o próximo preâmbulo indica uma nova mensagem. Como último passo, os bytes determinados são recodificados para ASCII e a mensagem modulada no emissor, é recuperada no lado do recetor.

5. MÓDULO DE CORREÇÃO GNSS

Neste capítulo é apresentado o módulo de aquisição do sinal de correção GNSS desenvolvido nesta dissertação, para ser integrado no sistema APP.

São ainda apresentados alguns dos seus componentes mais importantes, assim como o funcionamento de cada um de forma individual. Findada esta fase é apresentado o resultado final, no formato de uma *daughterboard* para integrar na *motherboard* do sistema APP.

Em seguida são demonstrados todos os passos para configurar o módulo de receção do sinal de correção GNSS, que são configurados por um microcontrolador da família RH-850 desenvolvido pela empresa RENESAS®.

5.1 Desenvolvimento da DaughterBoard

Este subcapítulo tem como intuito a apresentação do desenvolvimento da PCB capaz de efetuar a aquisição e desmodulação do sinal de correção GNSS, emitido por satélite. Como referido anteriormente, este sinal vem modulado numa onda situada na gama de frequências L-Band (1426 – 1575MHz). Desta forma há um número grande de considerações a ter, já que se trata da receção de uma frequência ultraelevada (UHF).

Nas seguintes subsecções serão apresentados os componentes principais da placa, que lhe conferem a habilidade de receber e condicionar o sinal na banda L, desmodular o sinal e por fim proceder à sua aquisição.

5.1.1 RF Analog Frontend

O circuito de entrada do sinal RF no módulo de correção GNSS é responsável pelo encaminhamento do sinal modulado até ao desmodulador, Max2121.

Como primeiro andar de direcionamento do sinal, o circuito de entrada tem um papel crítico para o bom funcionamento do módulo de correção. Objetivamente, este deve ser dimensionado de forma a corresponder o valor da sua impedância com o valor da impedância de entrada do desmodulador, ou seja, 75Ω . Este andar pode e deve também servir como primeiro filtro, atenuando frequências não pertencentes à banda L, apresentando assim o comportamento de um filtro passa-banda.

De forma a cumprir as tarefas supracitadas, o dimensionamento do circuito de entrada é feito utilizando condensadores e bobinas, e apresenta o aspeto da Figura 5-1.

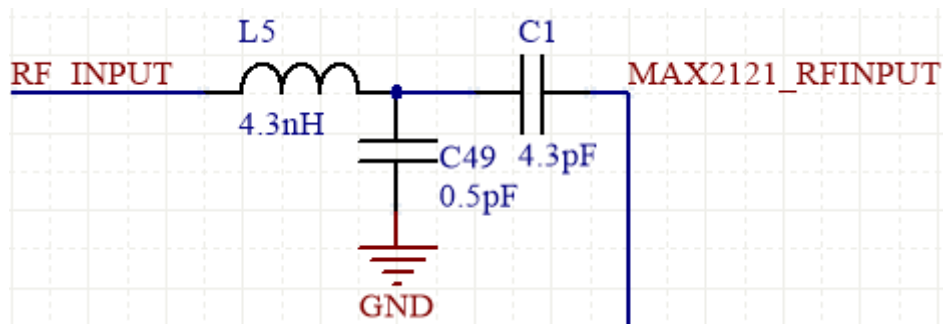


Figura 5-1 Circuito de Entrada RF

A resposta em frequência deste circuito é apresentada na Figura 5-2 e é denotado o ponto máximo em frequências próximas de 1.5GHz. Este é o comportamento pretendido, pelo que este dimensionamento pode ser considerado como adequado à situação.

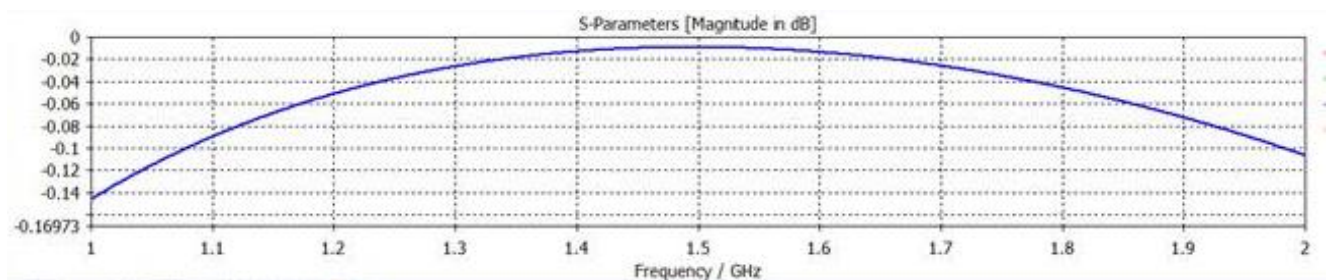


Figura 5-2 Resposta em Frequência do Circuito de Entrada

5.1.2 MAX2121

O sintonizador rádio MAX2121 é o elemento chave do módulo de correção GNSS, já que este permite a desmodulação de sinais modulados na L-Band. Mais concretamente, a gama de valores de frequência que podem ser desmoduladas por este componente abrange todos os valores entre os 925MHz e 2175MHz, com uma granularidade relativamente baixa.

A ter em consideração especial, os parâmetros críticos deste sistema são:

- Correspondência de impedâncias entre entrada do sinal RF do circuito e a entrada de RF do MAX2121;
- Alimentação 3.3V, e a cada ponto de VCC ligar um condensador de valor pré-estipulado à massa do circuito;
- Cancelamento de *offset* DC entre os pontos I_+ e I_- , Q_+ e Q_- através da introdução de condensadores de valor pré-estipulado entre os pontos IDC_+ e IDC_- , QDC_+ e QDC_- ;
- Introdução de um oscilador externo entre os 12MHz e os 30MHz com um valor de ESR (*Equivalent Series Resistance*) máximo não superior a 60Ω;

- Pista de encaminhamento de RF o mais curta possível;
- Diferentes pistas de saída diferencial IQ do MAX2121 com comprimentos iguais.

A placa de avaliação do IC (*Integrated Circuit*) MAX2121 foi utilizada como referência para dimensionar a instrumentação à volta do sintonizador.

A configuração deste IC é efetuada através de uma comunicação I2C, que permite a definição de 12 registos programáveis e ainda a leitura de 3 outros registos, cujo valor representa o estado de operação do MAX2121.

5.1.3 Conversor SPI para I2C CP2120

Como dito anteriormente, o IC MAX2121 necessita de ser configurado para utilização correta das suas funcionalidades em cada situação e esta configuração requer a existência de uma comunicação I2C.

O microcontrolador utilizado no sistema APP não contém nos seus periféricos uma interface I2C. A solução para este problema passa pela conversão de um tipo de comunicação disponível no microcontrolador numa comunicação I2C. O tipo de comunicação utilizada para ser convertida em I2C foi o SPI (*Serial Peripheral Interface*).

De forma a converter SPI em I2C foi utilizado o conversor CP2120[33], da empresa SILICON LABS®, cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 5-3.

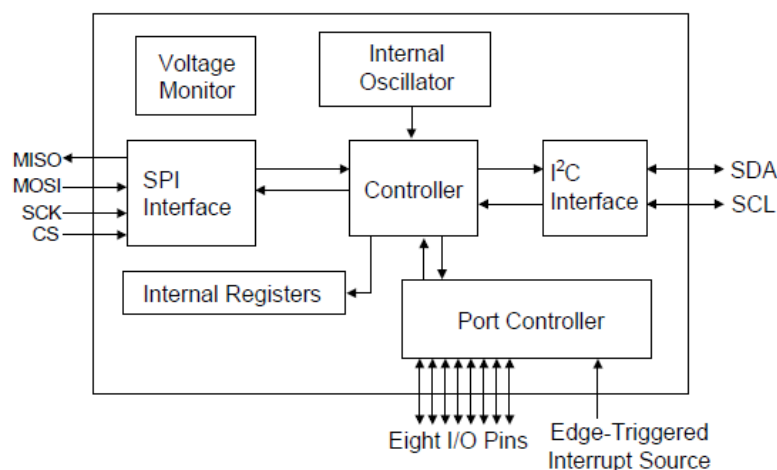


Figura 5-3 Conversor CP2120

Em termos de comunicação, este IC funciona como SPI *slave*, ou seja, o microcontrolador é a entidade responsável pelo controlo de fluxo de mensagens. Por outro lado, no que toca à comunicação I2C este dispositivo comporta-se como *master* e é este que controla o fluxo de mensagens direcionadas ao MAX2121, que por sua vez se comporta como *slave*.

De forma a configurar os parâmetros da comunicação, este conversor é dotado de 8 registos configuráveis que controlam fatores como a frequência de comunicação I2C, ordem dos bits a enviar (*Big-Endian* ou *Little-Endian*), entre outros. Existem ainda 2 registos de leitura, cujos valores estão relacionados com o estado do conversor e/ou da conversão.

5.1.4 Circuito de Leitura

Apontando à aquisição digital dos valores de IQ diferenciais, relativos ao sinal desmodulado, foi desenvolvido um circuito de leitura, composto por um filtro, um amplificador e um ADC.

Na fase de dimensionamento do filtro é tido em conta que os dados de *output* do MAX2121 vêm aliados a uma frequência residual (provocada pela diferença entre o valor de frequência da onda portadora e à frequência do oscilador interno do MAX2121) não superior a 40kHz.

De forma a limitar a gama de frequências do sinal de entrada no andar de amplificação, foi dimensionado e implementado um filtro passa-baixo, configurado para uma frequência de corte de 100kHz. Este filtro surge imediatamente antes do amplificador, o que permite evitar a amplificação indesejada de ruídos de alta frequência do sinal.

De forma a amplificar o sinal, o dispositivo utilizado foi o THS4552[34] da TEXAS INSTRUMENTS®, um amplificador de entrada e saída diferenciais, cujas principais características são:

- 145MHz de largura de banda;
- Slew Rate de 490 V/ μ s;
- Controlo de *output* de modo comum;
- Saída diferencial;
- Ruído na tensão de entrada de $4.6\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ a 100 kHz;
- Ganho em malha aberta de 119dB (DC).

O esquemático do circuito desenvolvido relativo aos andares de filtragem e amplificação dos sinais diferenciais IQ é apresentado na Figura 5-4.

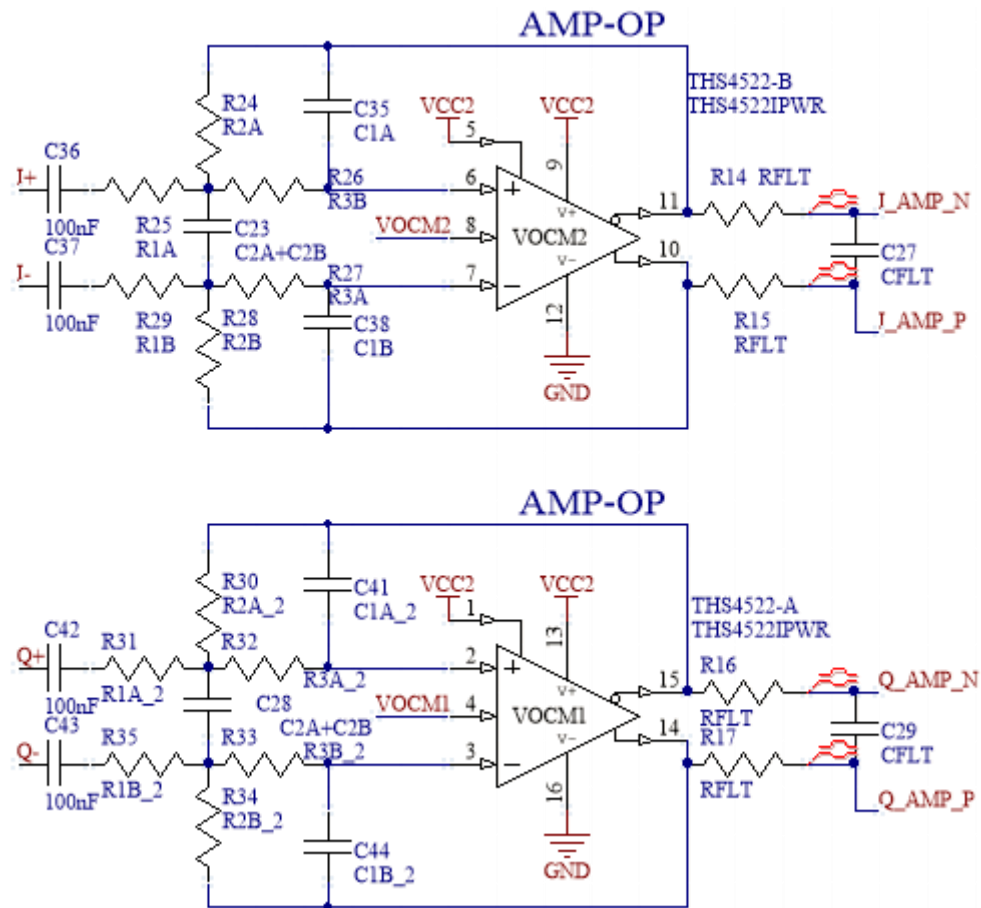


Figura 5-4 Andar de Filtragem e Amplificação dos Sinais Diferenciais IQ à saída do Conversor

Por fim, para aquisição do sinal é utilizado o ADC diferencial ads7254[35] da TEXAS INSTRUMENTS®, dotado da capacidade de adquirir amostras de dois canais distintos a uma frequência de amostragem de 1MS/s, com resolução de 12 bits. A configuração do modo de funcionamento do ADC, assim como a recepção das amostras convertidas por este dá-se através de uma comunicação SPI.

5.1.5 Conexão com a *MotherBoard* APP

A placa mãe do sistema APP foi desenvolvida de forma a poder integrar uma série de módulos como extras, garantindo assim a expansão das suas funcionalidades de forma dinâmica. Por esta razão, a placa tem 3 conectores do tipo FTSH-110-01-F-DV, colocados em posições fixas de forma a possibilitar a integração de módulos e a ligação dos mesmos através destes conectores.

Para garantir a integração do módulo de correção GNSS, este tem nas mesmas posições relativas os conectores complementares daqueles que estão na placa mãe.

Os sinais disponíveis nestes conectores estão essencialmente relacionados com alimentações para os circuitos a integrar e interfaces de comunicação. Existe ainda uma série de conexões reservadas para um outro módulo a integrar no APP, o módulo de receção de sinais GNSS. O esquemático presente na Figura 5-5 mostra os sinais presentes em cada conector, e este são explicados da seguinte forma:

- U5V* e U3V* - fonte de alimentação de 5V e 3V respetivamente;
- CSIH1* e CSIH3* - interfaces de comunicação SPI 1 e 3 respetivamente;
- UART0*, UART1* e UART3* - interfaces de comunicação RS232 1, 2 e 3 respetivamente;
- GNSS* - conexões para módulo GNSS (não relevante no contexto).

Nota: * - parte restante da nomenclatura não relevante.

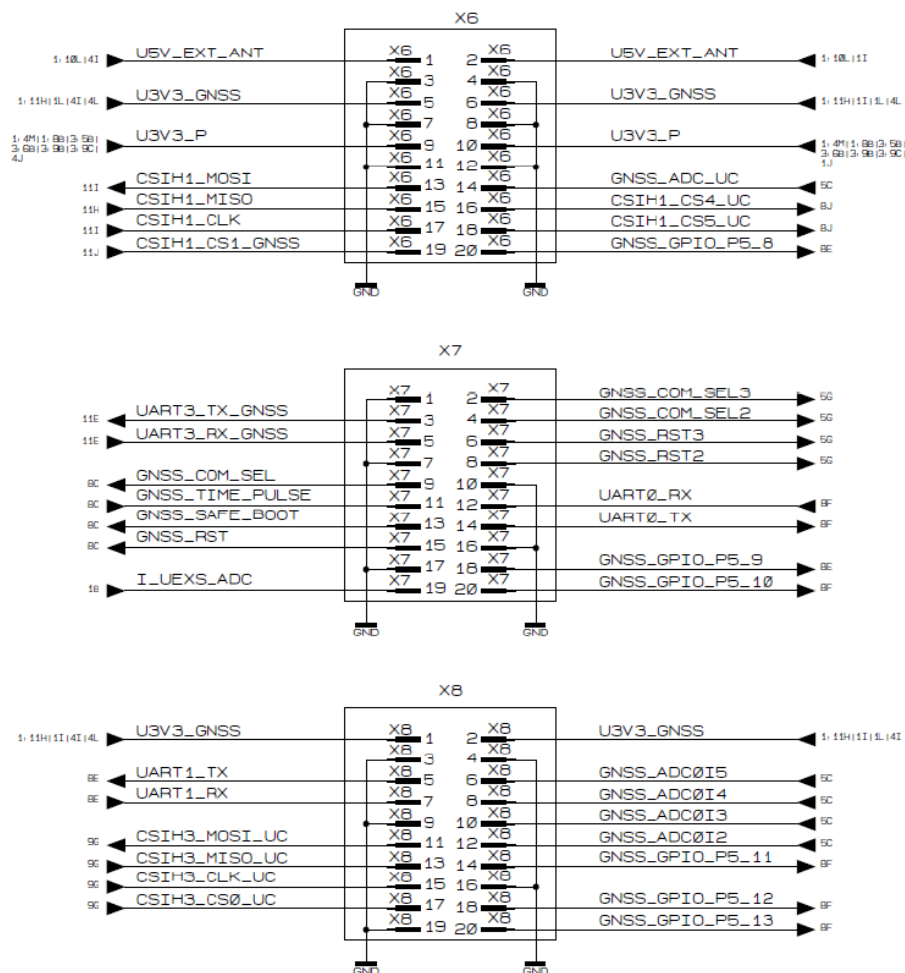


Figura 5-5 Esquemático dos Conectores

5.2 Configuração e Programação da *Daughterboard*

Nesta fase foi utilizado o microcontrolador RH850 presente na placa mãe do APP para configurar todos os componentes do módulo de recepção do sinal de correção GNSS.

A ordem funcional das configurações e funcionamento geral do programa é apresentada no fluxograma da Figura 5-6.

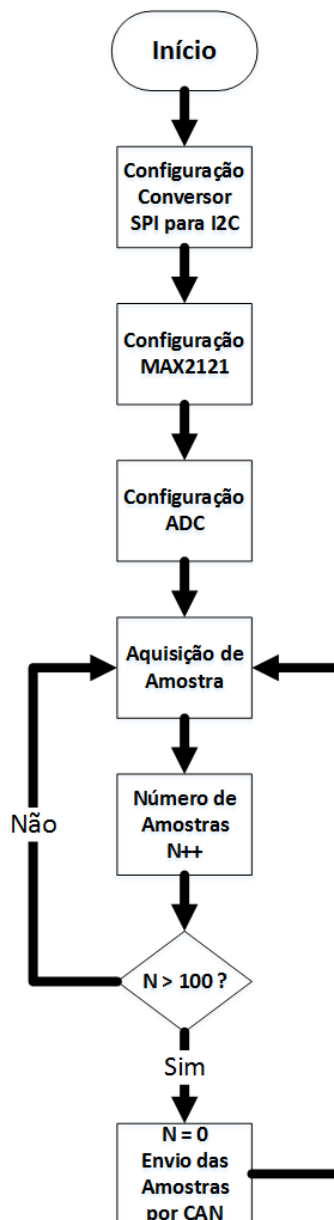


Figura 5-6 Fluxograma do Programa de Utilização do Módulo APP

5.2.1 Configuração Conversor SPI para I2C

Sendo que é necessária uma comunicação I2C para configurar o IC MAX2121, o primeiro elemento do módulo de receção do sinal de correção GNSS a configurar é o conversor SPI para I2C. Só desta forma é possível configurar o sintonizador rádio para desmodular os sinais pretendidos.

A Tabela 5-1 apresenta as configurações feitas nos registos internos do conversor, dando para cada uma das configurações uma breve explicação da sua função. Os restantes registos não tiveram necessidade de ser alterados, já que não tinham influência na comunicação, ou porque tomaram os valores por defeito, que permitem o correto funcionamento do conversor.

Tabela 5-1 Configuração CP2120

REGISTO	ENDEREÇO	VALOR	FUNÇÃO
IOCONFIG	0x00	0x00	Desligar funções dos portos configuráveis de entrada e saída do conversor
I2CCLOCK	0x02	0x64	Configurar frequência de oscilador da comunicação I2C para 20kHz
I2CADDRESS	0x05	0x00	Configurar endereço de <i>slave</i> de I2C para 0

5.2.2 Configuração MAX2121

O segundo elemento do circuito a ser configurado é o MAX2121. A configuração deste IC passa pela configuração de uma série de parâmetros para que este seja capaz de desmodular uma onda na frequência pretendida. Na Tabela 5-2 apresentam-se os valores passados a cada registo por I2C (convertido pelo conversor CP2120 a partir de SPI). Os restantes registos não tiveram necessidade de ser alterados, já que não tinham influência na configuração, ou porque tomaram os valores por defeito, que permitem o correto funcionamento do sintonizador.

Tabela 5-2 Configuração Registos MAX2121

REGISTO	ENDEREÇO	VALOR	FUNÇÃO
N-DIVIDER MSB	0x00	0x80	Parte mais significativa da parte inteira do divisor de frequência da PLL
N-DIVIDER LSB	0x01	0x37	Parte menos significativa da parte inteira do divisor de frequência da PLL
CHARGE-PUMP REGISTER	0x02	0x08	Configuração obrigatória ao ligar o dispositivo. Configuração de linearidade do dispositivo que fornece corrente ao circuito desmodulador.
F-DIVIDER MSB	0x03	0xEA	Parte mais significativa da parte fracionária do divisor de frequência da PLL
F-DIVIDER LSB	0x04	0x63	Parte menos significativa da parte fracionária do divisor de frequência da PLL
XTAL BUFFER and REFERENCE DIVIDER	0x05	0x81	Configuração do divisor do oscilador e ativação de um bit necessário para a ativação do circuito.
PLL Register	0x06	0x28	Configuração do divisor do VCO e escolha do valor de corrente do <i>charge-pump</i> .
VCO Register	0x07	0x40	Configuração de escolha de VCO (manual ou automática), é utilizada configuração manual. Configuração do valor de VCO
LP FILTER REGISTER	0x08	0x97	Configuração obrigatória ao ligar o dispositivo

5.2.3 Configuração ADC

Como dito anteriormente, a configuração e a aquisição da informação digital do ADC são feitas através de uma comunicação SPI. O ADC tem 3 registos configuráveis para determinar o seu modo de operação, sendo que estes registos não são configuráveis através do seu endereço, mas sim por comandos SPI de 16 bits. A lista de comandos que permitem configurar e uma breve explicação para cada são explicados na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 Configuração ADC

Comando	Registo	Funcionalidade
0x8440	CFR*	<ul style="list-style-type: none"> Definir a utilização de apenas 1 canal de saída SPI (<i>Slave Output</i>) em vez de 2 Escolher valor de excursão de saída entre $\pm V_{ref}$ Forçar utilização de referência interna dada pelos registos REFDAC_A e REFDAC_B
0x9FF8	REFDAC_A**	Configurar valor do DAC de referência para o canal A como 2.5V
0xAFF8	REFDAC_B***	Configurar valor do DAC de referência para o canal B como 2.5V

Nota: *Registo de Configuração

**Referência para DAC A

***Referência para DAC B

Por fim, para a aquisição dos valores convertidos pelo ADC dá-se numa comunicação SPI de 48 *clocks*, em apenas um canal de *output*. O ADC necessita das primeiras 16 transições negativas do relógio para converter o sinal analógico em digital, e nas seguintes transições são enviados os bits quer da leitura do ADC A quer do ADC B, com 12 bits cada. A estrutura da mensagem enviada pelo ADC com os dados é apresentada na Figura 5-7. Cada mensagem do ADC contém uma amostra de I e outra de Q, que juntas compõem o valor do sinal desmodulado pelo MAX2121, mais concretamente, os 12 bits do ADC A são referentes ao valor da componente I do sinal, ao passo que os 12 bits do ADC B são referentes à componente Q do sinal desmodulado.

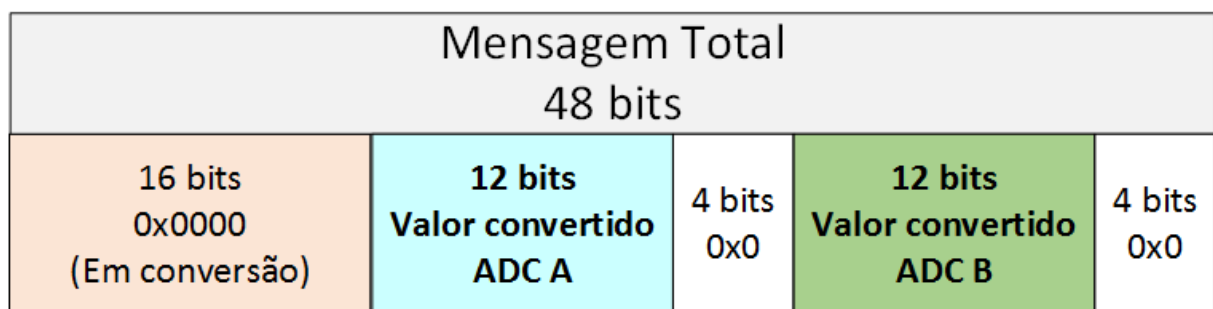


Figura 5-7 Mensagem SPI do ADC

5.2.4 Envio das Amostras por CAN

Nesta fase, a análise aos dados adquiridos pelo ADC é ainda feita no PC e apesar de os dados estarem disponíveis no microcontrolador para consulta, a fase de decodificação interna do sinal de correção está apontada para trabalho futuro, pelo que os dados são agora enviados para o MATLAB no *host* PC através de uma comunicação CAN com este.

O protocolo CAN utilizado é caracterizado por permitir o envio de mensagens de 8 bytes, e cada amostra do sinal (caracterizada por I e Q) é composta por 12+12 bits. De forma a facilitar o processamento, o valor das variáveis I e Q foram armazenados em *words* de 16 bits cada, pelo que cada amostra de um instante é composta por 32 bits (4 bytes). Desta forma cada mensagem CAN contém 2 amostras, ou seja, dois valores de I e dois valores de Q.

Finalmente, é utilizada a ferramenta PEAK-CAN USB (um *transceiver* CAN), ligada à *motherboard* do sistema APP por CAN e ao computador por USB para possibilitar a receção dos dados no *host* para pós processamento.

5.3 Cenário de Aplicação do Módulo de Receção do Sinal de Correção

O do módulo de receção do sinal de correção GNSS torna possível ao sistema APP a receção do sinal de correção GNSS, com vista na melhoria da resolução e da exatidão associadas à medição de posição deste sistema. O aspeto deste módulo é apresentado na Figura 5-8, demonstrando a representação tridimensional da vista de topo deste módulo, e na Figura 5-9 é apresentada representação tridimensional da vista de baixo do mesmo módulo. O esquemático completo referente ao desenvolvimento total desta PCB está integrado no Anexo I.

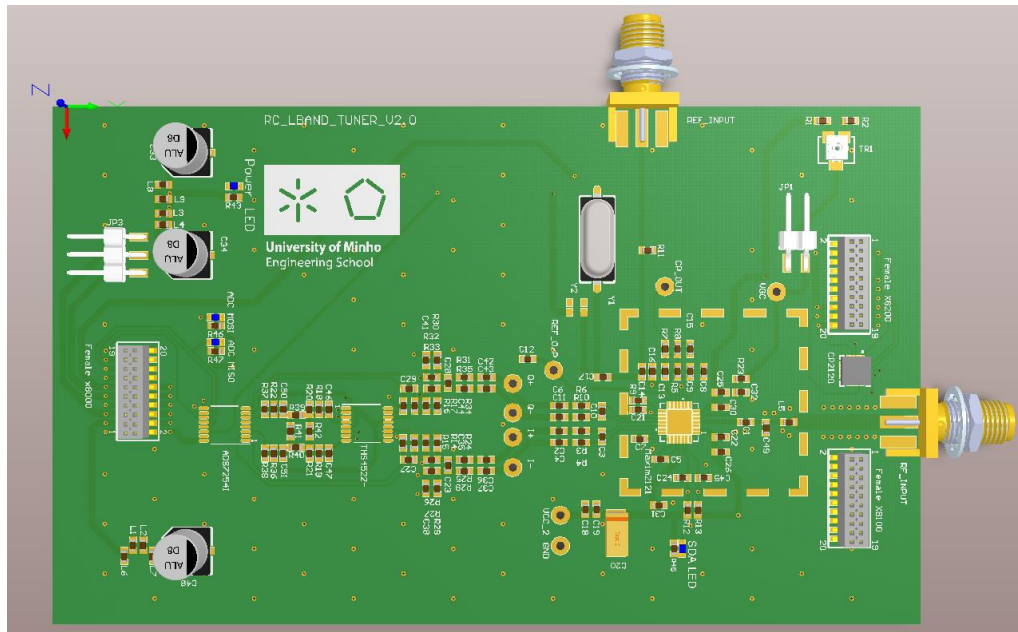


Figura 5-8 Vista de Topo Módulo de Correção

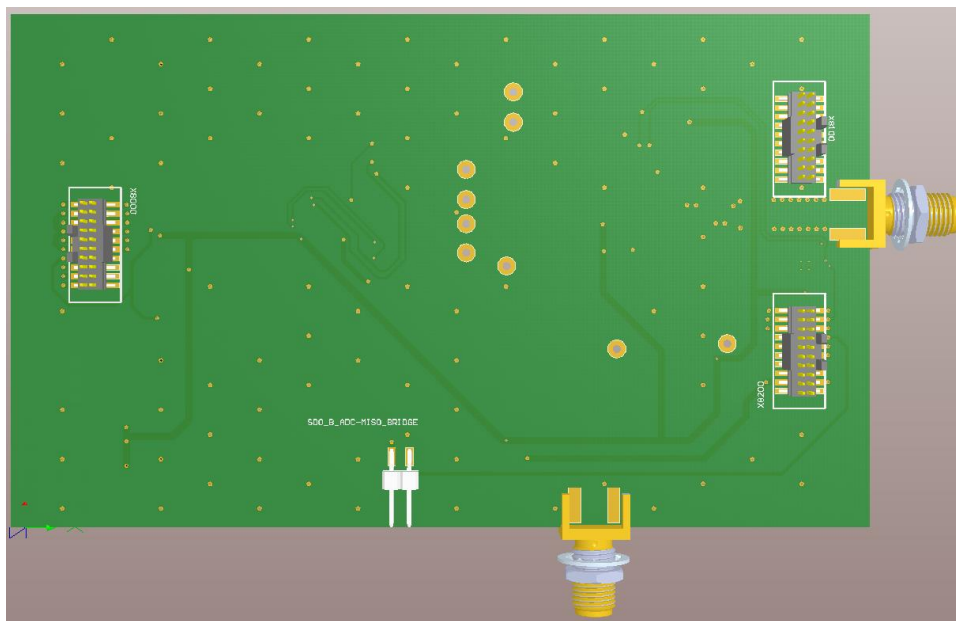


Figura 5-9 Vista de Baixo Módulo de Correção

Por fim, a utilização deste módulo permite a redução de uma série de instrumentação aquando do processo de aquisição e desmodulação do sinal BPSK.

Essencialmente a instrumentação suprimida com esta placa é a placa de aquisição NI-DAQ, o kit de avaliação do IC MAX2121, a interface de comunicação INTF3000 e as fontes de alimentação (para alimentar o circuito do MAX2121 e para determinar a tensão que define o ganho V_{gc}). De forma a provar

isto, a Figura 5-10 mostra o novo diagrama sobre a visão geral do sistema de aquisição e desmodulação BPSK utilizando o módulo de receção do sinal de correção GNSS:

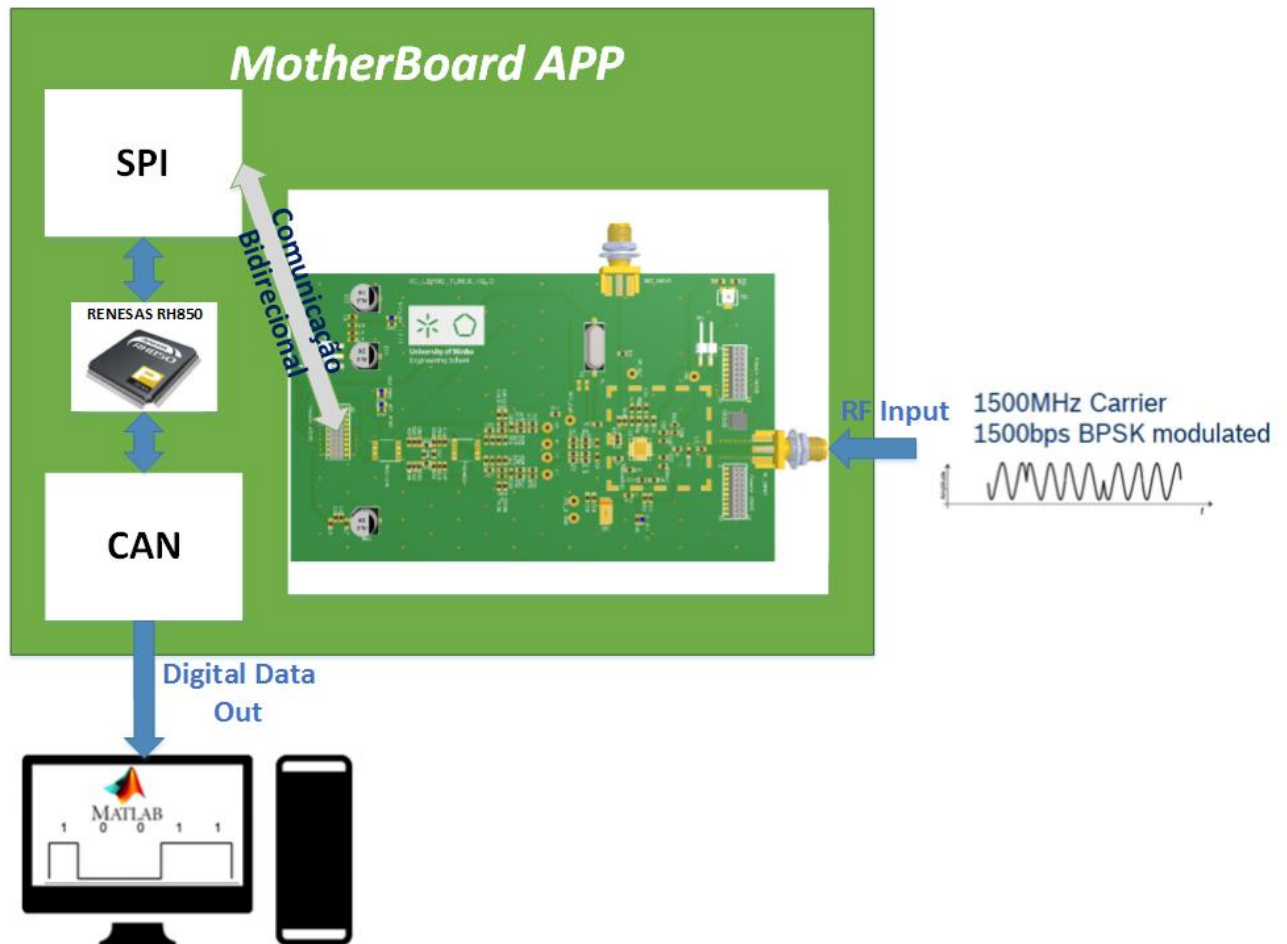


Figura 5-10 Visão Geral sobre o Processo de Desmodulação utilizando o Módulo de Correção

Resumidamente, o facto de todos os componentes estarem agora integrados no sistema APP, quer de aquisição de sinal, quer de desmodulação reduz a quantidade de material necessário, e acima de tudo reduz o esforço temporal desta atividade, já que é um sistema completo, totalmente integrado.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que os resultados foram constantemente apresentados, juntamente com o desenvolvimento quer do algoritmo, quer do módulo, resta agora fazer uma reflexão sobre estes e sobre a sua relevância. Por outro lado, é também pertinente uma explicação das dificuldades encontradas, assim como fatores que limitaram a execução de algumas partes a integrar no módulo de recepção do sinal de correção GNSS.

Durante a primeira fase da dissertação, o objetivo foi a aquisição de conhecimentos, para posterior utilização dos mesmos, tendo em vista o cumprimento dos objetivos delineados. Neste âmbito, os conhecimentos adquiridos são:

- Compreensão das técnicas utilizadas pelos serviços de correção;
- Compreensão das formas de comunicação da informação de correção aos utilizadores dos serviços;
- Estudo sobre técnicas de modulação e desmodulação digital, aliadas a processamento de sinal;
- Estudo sobre sinais emitidos em Radiofrequências e *frontend* analógico.

Parte destes conhecimentos foi seguidamente utilizada na abordagem de teste à comunicação BPSK, quer do lado da modulação, quer do lado da desmodulação. O desenvolvimento e teste deste sistema apresenta alguns resultados por si, estes são:

- Configuração do IC MAX2121 e completo entendimento sobre o seu funcionamento e utilidade;
- Desenvolvimento de aplicação em Qt de utilização do USRP N210 para modulação e emissão de sinais em radiofrequência;
- Desenvolvimento de algoritmo próprio de desmodulação BPSK, que funciona mesmo sobre situações de variação de fase em pontos críticos. Esta característica é possível verificar na Figura 6-1 onde a variação de fase ocorre de forma não muito óbvia, e em seguida segue um comportamento muito próximo do comportamento normal, ou seja, poderia facilmente ter passado despercebida ao algoritmo, o que comprometeria todo o sistema de desmodulação;
- Determinação de protocolo de comunicação (utilização de preâmbulos e EOT para resolver ambiguidades de comunicação BPSK);
- Recuperação total de sinal modulado em BPSK.

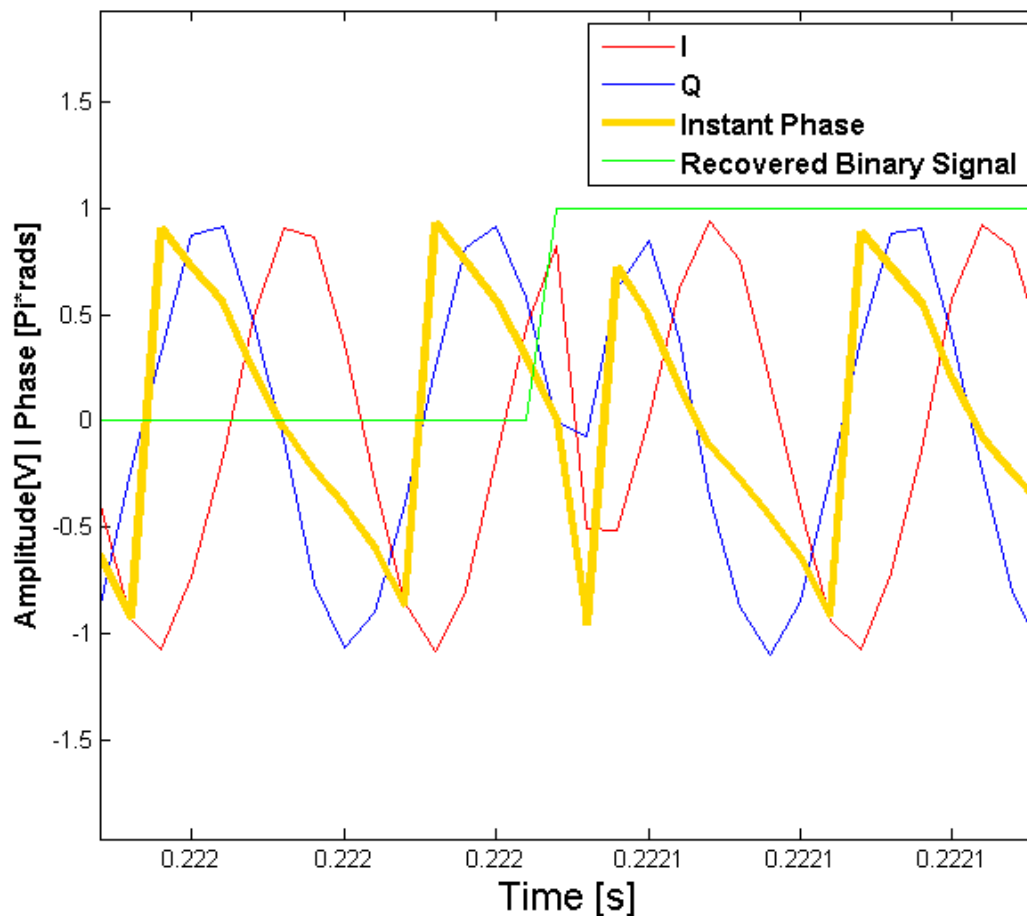


Figura 6-1 Funcionamento do Algoritmo de Desmodulação em Ponto Crítico

Por fim e na última fase da dissertação, relativa ao desenvolvimento do módulo de receção do sinal de correção GNSS, há uma série de resultados a tirar, são eles então:

- Escolha dos componentes mais adequados à situação;
- Desenvolvimento da PCB;
- Configuração de cada componente, através de comunicações SPI e I2C;
- Integração de todos os componentes de desmodulação e leitura de sinal num único dispositivo;
- Construção de um módulo, integrável no sistema APP, capaz de desmodular sinais da mesma natureza que o sinal de correção GNSS, pelo que tudo aponta ser também capaz de desmodular o sinal de correção na L-Band, cumprindo assim o seu propósito;
- Receção do Sinal BPSK, desmodulação pelo IC MAX2121, aquisição de sinal pelo ADC ADS7254 e transferência dos dados por CAN para pós processamento na ferramenta do MATLAB, os resultados desta aquisição são demonstrados nas Figura 6-2 e Figura 6-3, onde é possível ver a recuperação da onda binária e uma transição de fase detetável, respetivamente.

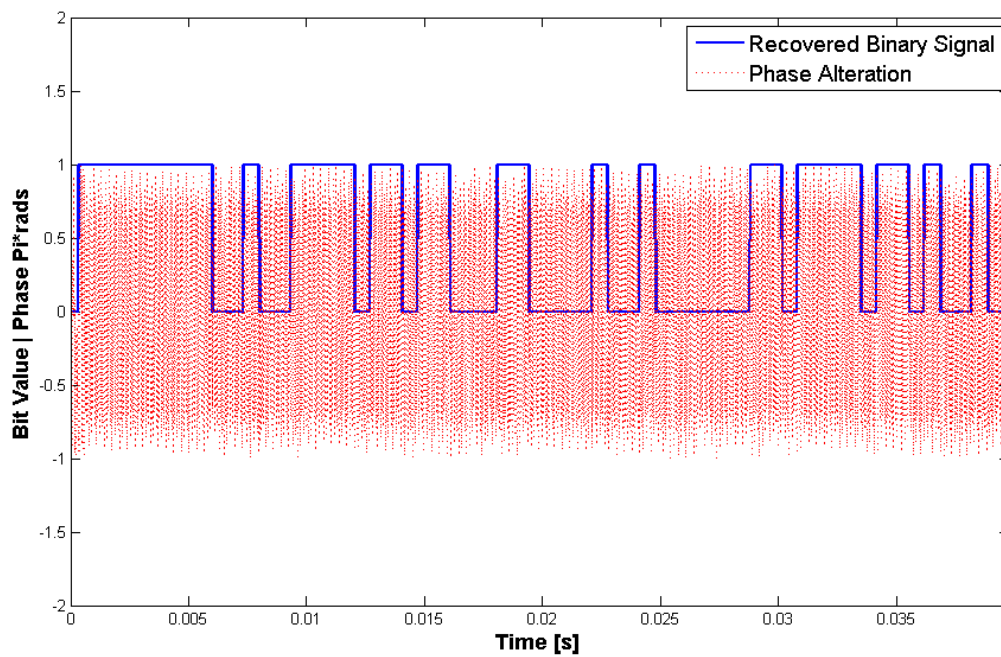


Figura 6-2 – Sinal de Dados Recuperado e Onda de Fase do Sinal

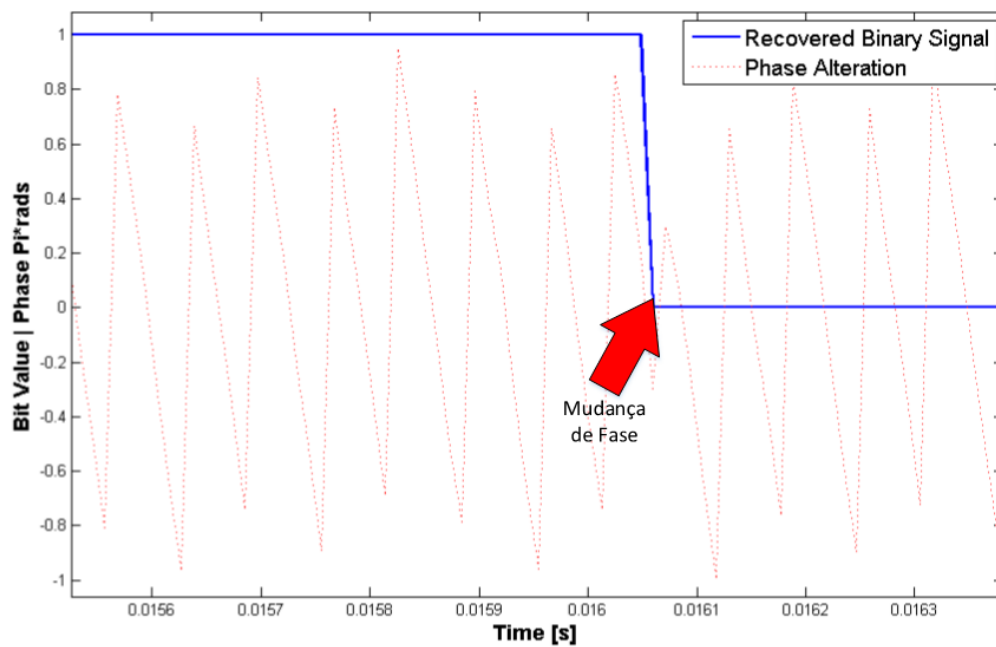


Figura 6-3 - Mudança de Fase Detetada e Variação do Valor do Bit

A execução de todas as atividades desta dissertação tem em vista a receção do sinal de satélite como objetivo final, contudo, este passo ainda não foi efetuado.

A razão principal para a não aquisição do sinal de satélite diretamente está relacionada com atrasos de execução das tarefas. Estes atrasos são fruto de problemas inesperados e relacionados com diversos fatores, a lista dos fatores de atraso é a seguinte:

- Erros no desenvolvimento da PCB, pelo que foram feitas 3 versões até ao resultado final apresentado no Anexo I. Estes erros causaram ainda efeitos secundários, porque até serem descobertos, levaram a crer que os erros estavam relacionados com os diferentes componentes do módulo de correção GNSS, em questões de software e hardware;
- Processo moroso de aprendizagem de utilização do USRP N210;
- Informação relativamente escassa sobre serviços de correção GNSS e principalmente sobre quais as frequências e satélites responsáveis pela emissão deste sinal;
- Microcontrolador da placa APP (requisito de hardware) bastante complexo e até total domínio do mesmo, apresenta uma série de limitações.

Todas estas razões não permitiram a perfeita execução do proposto, contudo, o trabalho desenvolvido é totalmente dotado (a menos de uma série de calibrações e configurações) para receber o sinal de satélite e extrair dele a informação de correção GNSS. O módulo pode ainda ser utilizado como uma ferramenta genérica de desmodulação de sinais na L-Band, pelo que, o leque de aplicações às quais este dispositivo pode dar resposta é bastante amplo.

7. CONCLUSÃO

O objetivo principal desta dissertação era o desenvolvimento de um dispositivo de aquisição e desmodulação da banda de correção GNSS. Como apresentado no capítulo anterior, o dispositivo foi desenvolvido e é capaz de desmodular com alta fiabilidade sinais modulados em BPSK, graças ao algoritmo de desmodulação desenvolvido.

É então de concluir que, o módulo de correção GNSS desenvolvido é uma ferramenta muito poderosa, graças à integração de um mecanismo de desmodulação da banda L com um sistema de aquisição que permite com um único dispositivo fazer a aquisição do sinal já desmodulado. Comparativamente com o esforço feito no capítulo 4, utilizando diferentes dispositivos para em primeira instância desmodular e depois para adquirir o sinal desmodulado, o módulo desenvolvido apresenta uma série de vantagens.

Contudo, ainda há formas de melhorar o sistema, e por isso é destacado para trabalho futuro:

- Implementação do algoritmo de desmodulação desenvolvido na *motherboard* do sistema APP;
- Implementação do algoritmo de desmodulação em tempo real;
- Análise da receção do sinal de satélite e ajuste de ganhos para este efeito;
- Configuração totalmente automática do sintonizador MAX2121, que deve partir de uma realimentação para diminuir a frequência residual entre a frequência gerada internamente pelo VCO do IC e a frequência da onda portadora, isto além de uma melhor sintonização, permite baixar a frequência de amostragem de leitura do sinal;
- Alterar novamente PCB de forma a utilizar 2 canais de saída de dados do ADC em vez de 1, de forma a aumentar o seu *throughput*.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Pietrasik Tom, "Road traffic injuries," *Violence Inj. Prev.*, 2016.
- [2] I.S.T. Cadeira de Transportes, "Mobilidade Urbana," Lisboa, 1999.
- [3] Bogdan Pop, "How Does Mercedes Pre-Safe Work - autoevolution." [Online]. Available: <http://www.autoevolution.com/news/how-does-mercedes-pre-safe-work-6535.html>.
- [4] E. D. Kaplan and C. (Christopher J. . Hegarty, *Understanding GPS : principles and applications*. Artech House, 2006.
- [5] W. Lechner and S. Baumann, "Global navigation satellite systems," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 25, no. 1–2, pp. 67–85, 2000.
- [6] M. S. Grewal, L. R. Weill, and a. P. Andrews, *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, Second Edition*. 2006.
- [7] M. Pérez-Ruiz, J. Carballido, J. Agüera, and J. A. Gil, "Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles," *Precis. Agric.*, vol. 12, no. 5, pp. 639–652, 2011.
- [8] Hemisphere Gnss, "Global Correction Services for GNSS," 2015.
- [9] Y. Feng and C. Rizos, "Three Carrier Approaches for Future Global, Regional and Local GNSS Positioning Services: Concepts and Performance Perspectives," *Proc. ION GNSS 2005, 18th Int. Tech. Meet. Satell. Div. Inst. Navig.*, pp. 2277–2287, 2005.
- [10] "RTK Fundamentals - Navipedia." [Online]. Available: http://www.navipedia.net/index.php/RTK_Fundamentals. [Accessed: 07-Feb-2016].
- [11] "Sub Centimeter GPS With RTKLIB - 2." [Online]. Available: <http://www.instructables.com/id/Sub-Centimeter-GPS-With-RTKLIB/step2/How-it-Works/>.
- [12] "PPP Fundamentals - Navipedia." [Online]. Available: http://www.navipedia.net/index.php/PPP_Fundamentals.
- [13] Tony Murfin, "Look, No Base-Station! — Precise Point Positioning (PPP) : GPS World," 2013. [Online]. Available: <http://gpsworld.com/look-no-base-station-precise-point-positioning-ppp/>. [Accessed: 23-May-2016].
- [14] M. S. Grewal and A. P. Andrews, "Applications of Kalman filtering in aerospace 1960 to the present," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 30, no. 3, pp. 69–78, 2010.
- [15] C. Rizos, V. Janssen, C. Roberts, and T. Grinter, "Precise Point Positioning: Is the Era of Differential

- GNSS Positioning Drawing to an End?," *FIG Work. Week 2012*, no. May, pp. 1–17, 2012.
- [16] "SBAS Fundamentals." [Online]. Available: http://www.navipedia.net/index.php/SBAS_Fundamentals. [Accessed: 24-Jun-2016].
- [17] E. Chatre, "GNSS Development Status and Future Work ICAO Presentation." ICAO.
- [18] "What is SBAS? | EGNOS Portal." [Online]. Available: <https://www.egnos-portal.eu/discover-egnos/about-egnos/what-sbas>.
- [19] "The EGNOS SBAS Message Format Explained - Navipedia." [Online]. Available: http://www.navipedia.net/index.php/The_EGNOS_SBAS_Message_Format_Explained. [Accessed: 23-May-2016].
- [20] Hemisphere GNSS, "Atlas™ GNSS Global Correction Service," 2016.
- [21] Hemisphere GNSS, "AtlasLink™ Smart Antenna." .
- [22] N. Brown, R. Keenan, B. Richter, and L. Troyer, "Advances in ambiguity resolution for RTK applications using the new RTCM V3. 0 Master-Auxiliary messages," *Ion Gnss 2005*, no. September, pp. 13–16, 2005.
- [23] "RTK Mapa de cobertura » Agricultura de precisão » Raven Slingshot®." [Online]. Available: <http://pt.ravenslingshot.com/coverage-map/>.
- [24] J. Feigin, "Practical Costas loop design," *RF signal Process.*, no. January, pp. 20–36, 2002.
- [25] A. B. Carlson, P. B. Crilly, and J. C. Rutledge, *Communications Systems*. .
- [26] L. Frenzel, "Understanding Modern Digital Modulation Techniques," *Electron. Des. Mag.*, vol. 23, 2012.
- [27] A. Note, "QPSK Modulation Demystified Quadrature-Phase-Shift Modulation," pp. 1–5, 2002.
- [28] S. O. Tatu, E. Moldovan, K. Wu, R. G. Bosisio, and T. A. Denidni, "Ka - Band Analog Front - End for Software - Defined Direct Conversion Receiver," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 9, 2005.
- [29] Ettus Research, "USRP Hardware Driver and USRP Manual." [Online]. Available: <http://files.ettus.com/manual/>.
- [30] MaximIntegrated, "Complete Direct-Conversion L-Band Tuner MAX2121 Datasheet." pp. 1–20.
- [31] Maxim Integrated, "Max2121 EV-Kit - Evaluates Max2121," pp. 1–15.
- [32] C. Kikkert and C. Blackburn, "Digitally Demodulating Binary Phase Shift Keyed Data Signals," ... *Information, Commun. Signal* ..., no. I, 1999.
- [33] Silicon Labs, "CP2120 SPI2I2C Bridge." pp. 1–24, 2015.
- [34] Texas Instruments, "THS452x Very Low Power , Negative Rail Input , Rail-To-Rail Output , Fully

Differential AmPOP Datasheet.” 2015.

- [35] Texas Instruments, “ADSxx54 Dual, High-Speed, 16-, 14-, and 12-Bit, Simultaneous-Sampling, Analog-to-Digital Converters 1,” 2014.

The diagram illustrates the 'Connectors' section of a PCB layout. It features three FTSH-110-01-F-DV-K connectors, labeled X38100, X38200, and X38300. Each connector has 20 pins. The connections are as follows:

- X38100:** Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 are connected to various components. Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 are connected to M.5, M.6, M.9, M.10, and M.11. Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 are connected to D_VCC, D_GND, and various ADCs (SDI, SDO, SCL, CS).
- X38200:** Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 are connected to various components. Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 are connected to M.5, M.6, M.9, M.10, and M.11. Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 are connected to D_VCC, D_GND, and various ADCs (SDI, SDO, SCL, CS).
- X38300:** Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 are connected to various components. Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 are connected to M.5, M.6, M.9, M.10, and M.11. Pins 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 are connected to D_VCC, D_GND, and various ADCs (SDI, SDO, SCL, CS).

The diagram also shows connections to D_VCC, D_GND, and various ADCs (SDI, SDO, SCL, CS). The components are labeled with their respective pin numbers and connection points.

